

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

**REGULACE STEJNOSMĚRNÉHO NÁBOJOVÉHO CYKLO
DYNAMA**

REGULATION OF DC HUB DYNAMO

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Petr Navrátil

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Huták, Ph.D.

BRNO 2020

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Petr Navrátil

ID: 203302

Ročník: 3

Akademický rok: 2019/20

NÁZEV TÉMATU:

Regulace stejnosměrného nábojového cyklo dynamu

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Na základě naměřených charakteristik navrhnete vhodné zapojení pro lepší využití výkonu dynamu.
2. Navrhnete vhodný algoritmus řízení a navržený obvod realizujete.
3. Ověřte funkci navrženého zařízení.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] P. Vorel, P. Procházka: Řídicí členy v elektrických pohonech (skriptum VUT Brno)
- [2] M. Patočka: Magnetické jevy a obvody ve výkonové elektronice

Termín zadání: 3.2.2020

Termín odevzdání: 10.6.2020

Vedoucí práce: Ing. Petr Huták, Ph.D.

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Cílem této bakalářské práce je teoretická příprava, návrh a realizace stejnosměrného měniče pro cyklistické nábojové dynamo s kompenzací jeho velké indukčnosti. Navržený měnič bude schopen využít maximální výkon dynamu.

Klíčová slova

Cyklistické nábojové dynamo, DC/DC měnič, snižující měnič, MPPT cyklistického nábojového dynamu

Abstract

The aim of this bachelor's thesis is the theoretical preparation, design and implementation of a DC converter for a bicycle charge dynamo with compensation for its large inductance. The designed converter will be able to use the maximal power of the dynamo.

Keywords

Cyclic hub dynamo, DC/DC converter, buck converter, MPPT for cyclic hub dynamo

Bibliografická citace:

NAVRÁTIL, Regulace stejnosměrného nábojového cyklo dynama [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-06-10]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/125814>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky. Vedoucí práce Petr Huták.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta: Petr Navrátil

VUT ID studenta: 203302

Typ práce: Bakalářská práce

Akademický rok: 2019/20

Téma závěrečné práce: Regulace stejnosměrného nábojového dynama

„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: **10. června 2020**

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Petru Hutákovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne: **10. června 2020**

.....
podpis autora

OBSAH

OBSAH.....	7
SEZNAM OBRÁZKŮ	8
SEZNAM TABULEK.....	10
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	11
1 ÚVOD.....	12
2 MĚNIČE	13
2.1 ROZDĚLENÍ DC/DC MĚNIČŮ.....	13
2.2 ZAPOJENÍ DC/DC MĚNIČŮ.....	14
2.2.1 SNIŽUJÍCÍ MĚNIČ (BUCK, STEP DOWN).....	14
2.2.2 ZVYŠUJÍCÍ MĚNIČ (BOOST, STEP UP).....	CHYBA! ZÁLOŽKA NENÍ DEFINOVÁNA.
2.2.3 INVERTUJÍCÍ MĚNIČ	15
2.2.4 AKUMULUJÍCÍ MĚNIČ (FLYBACK).....	16
2.2.5 PROPUSTNÝ MĚNIČ (FORWARD).....	17
2.2.6 MĚNIČ V ZAPOJENÍ PUSH-PULL	18
2.2.7 MĚNIČ V ZAPOJENÍ PLNÝ MOST.....	19
3 SYNCHRONNÍ STROJE	21
3.1 CYKLISTICKÉ DYNAMO.....	21
4 MPPT	22
5 MĚŘENÍ CYKLISTICKÉHO DYNAMA	23
6 NÁVRH MĚNIČE	27
6.1 BOČNÍK	27
6.2 MĚŘENÍ NAPĚTÍ	27
6.3 ZVOLENÝ MIKROPROCESOR PRO ŘÍZENÍ.....	28
6.4 SCHÉMA ZAPOJENÍ SNIŽUJÍCÍHO MĚNIČE CN3791.....	28
6.4.1 POPIS ZAPOJENÍ.....	28
6.5 SCHÉMA ZAPOJENÍ VÝROBKU	29
6.5.1 POPIS ZAPOJENÍ.....	29
6.6 ALGORITMUS PRO ŘÍZENÍ PŘIPÍNÁNÍ KAPACITY	32
6.6.1 VÝVOJOVÉ PROSTŘEDÍ	33
6.6.2 OKOMENTOVANÝ KÓD	34
7 SIMULACE A OVĚŘENÍ FUNKČNOSTI.....	35
7.1 MODEL.....	35
7.2 SIMULACE	38
7.3 MĚŘENÍ VYKOMPENZOVANÉHO CYKLISTICKÉHO DYNAMA.....	41
8 ZÁVĚR.....	42
POUŽITÁ LITERATURA	43

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 2-1 Snižující měnič: a) tranzistor Q1 sepnut, b) tranzistor Q1 rozepnut[3]</i>	14
<i>Obr. 2-2 Zvyšující měnič: a) tranzistor Q1 sepnut, b) tranzistor Q1 rozepnut[3]</i>	15
<i>Obr. 2-3 Invertující měnič: a) tranzistor Q1 sepnut, b) tranzistor Q1 rozepnut[3]</i>	16
<i>Obr. 2-4 Akumulující měnič: a) tranzistor Q1 sepnut, b) tranzistor Q1 rozepnut[3]</i>	17
<i>Obr. 2-5 Propustný měnič: a) tranzistor Q1 sepnut, b) tranzistor Q1 rozepnut[3]</i>	18
<i>Obr. 2-6 Push-pull měnič: a) tranzistor Q1 sepnut a tranzistor Q2 rozepnut, b) tranzistor Q1 rozepnut a tranzistor Q2 sepnut [3]</i>	19
<i>Obr. 2-7 Měnič v zapojení plný most[3]</i>	20
<i>Obr. 5-1 Závislost indukovaného napětí na frekvenci</i>	23
<i>Obr. 5-2 Závislost proudu nakrátko na frekvenci</i>	24
<i>Obr. 5-3 Závislost proudu a výkonu na frekvenci při konstantním napětí</i>	25
<i>Obr. 5-4 Přípravek pro odměření charakteristik cyklistického dynama</i>	26
<i>Obr. 6-1 Schéma zapojení snižujícího měniče CN3791[6]</i>	28
<i>Obr. 6-2 Schéma zapojení pro lepší využití výkonu z cyklistického dynama</i>	29
<i>Obr. 6-3 Program pro výpočet optimálního bodu sepnutí</i>	31
<i>Obr. 6-4 Vývojové prostředí Arduino IDE</i>	33
<i>Obr. 6-5 Okomentovaný program pro mikropočítač</i>	34
<i>Obr. 6-6 Okomentovaný program pro mikropočítač</i>	34
<i>Obr. 7-1 Navrhnuté schéma v simulinku pro simulaci charakteristik cyklistického dynama</i>	35
<i>Obr. 7-2 Blok Ramp</i>	35
<i>Obr. 7-3 Blok Gain</i>	35
<i>Obr. 7-4 Blok Simulink-PS Converter</i>	36
<i>Obr. 7-5 Blok PS-Simulink Converter</i>	36
<i>Obr. 7-6 Programmable voltage source</i>	36
<i>Obr. 7-7 Blok Resistor</i>	36
<i>Obr. 7-8 Blok Inductor</i>	36
<i>Obr. 7-9 Zkratování kondenzátorů</i>	37
<i>Obr. 7-10 Připínání a odpínání kompenzační kapacity</i>	37
<i>Obr. 7-11 Bloky pro měření napětí a proudu z knihovny Simscape</i>	37
<i>Obr. 7-12 Blok nastavitelného odporu z knihovny Simscape</i>	37
<i>Obr. 7-13 PID regulátor</i>	37
<i>Obr. 7-14 Část modelu počítající efektivní hodnotu</i>	38

<i>Obr. 7-15 Blok Product</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 7-16 Blok Scope.....</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 7-17 Průběh výkonu v závislosti na rychlosti pro model bez kompenzace indukčnosti</i>	<i>39</i>
<i>Obr. 7-18 Průběh proudu v závislosti na rychlosti pro model bez kompenzace indukčnosti</i>	<i>39</i>
<i>Obr. 7-19 Průběh napětí v závislosti na rychlosti pro model bez kompenzace indukčnosti.....</i>	<i>39</i>
<i>Obr. 7-20 Průběh výkonu v závislosti na rychlosti pro model s kompenzací indukčnosti.....</i>	<i>40</i>
<i>Obr. 7-21 Průběh proudu v závislosti na rychlosti pro model s kompenzací indukčnosti</i>	<i>40</i>
<i>Obr. 7-22 Průběh napětí v závislosti na rychlosti pro model s kompenzací indukčnosti</i>	<i>41</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 2-1 Výhody a nevýhody lineárních stabilizátorů[3]</i>	13
<i>Tabulka 5-1 Cyklistické dynamo měření naprázdno</i>	23
<i>Tabulka 5-2 Cyklistické dynamo měření nakrátko</i>	24
<i>Tabulka 5-3 Měření výkonové charakteristiky cyklistického dynama při konstantním napětí</i>	24
<i>Tabulka 7-1 Naměřené hodnoty výkonu po vykompenzování indukčnosti</i>	41

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

W	energie	[J]
P	výkon	[W]
f	frekvence	[Hz]
n	rychlost otáčení	[ot/min ⁻¹]
K	konstanta stroje	[Vs]
p	počet pólových dvojic	[-]
C	kapacita	[F]
ω	úhlová rychlost	[rad·s ⁻¹]
L	indukčnost	[H]
o	obvod kruhu	[m]
v	rychlost	[km/h]
I	proud	[A]
R	odpor	[Ω]
U	napětí	[V]
π	Ludolfovo číslo	[-]
DC	Direct Current	
AC	Alternating Current	
PWM	Pulse Width Modulation	
PLA	Polylactic Acid	
A/D	Analog/Digital	
I/O	Input/Output	
SPI	Seriál Peripheral Interface	
I ² C	Inter-Integrated Circuit	
USB	Universal Serial Bus	
PC	Personal Computer	
SRAM	Static Random Access Memory	
EEPROM	Electrically Erassable Programmable Read-Only Memory	

1 ÚVOD

Cílem této bakalářské práce je návrh vhodného algoritmu a zapojení pro lepší využití výkonu cyklistického nábojového dynama. Tato dynama jsou stále navrhována pro dříve používané žárovkové osvětlení. Od určité rychlosti se chovají jako zdroj proudu čímž, bylo zabezpečeno víceméně konstantní osvětlení nezávislé na rychlosti jízdy. V dnešní době LED osvětlení je využití dynama spíše pro dobíjení drobných přenosných spotřebičů (GPS navigace, mobily...), proto je tedy žádoucí pokusit se získat z dynama co nejvíce energie a tu ukládat do vhodného akumulátoru.

První část práce obsahuje úvod k problematice měničů a jejich rozdělení mezi jednotlivé druhy. Podrobněji jsou rozebrány měniče DC/DC.

Další část se zabývá měřením charakteristik cyklistického dynama, návrhem obvodu a algoritmu pro lepší využití výkonu. Dále je v této části popsán mikrokontrolér použitý pro řízení připínání kompenzační kapacity. Je zde popsán program napsaný pro daný mikrokontrolér.

Poslední část práce je zaměřena na náhradní model zařízení v prostředí simulink. Porovnávají se zde vygenerované charakteristiky z modelu s odměřenými hodnotami na reálném zařízení.

2 MĚNIČE

Všechny druhy měničů nějakým způsobem mění parametry elektrické energie. V dnešních zařízeních je častá kombinace některých druhů měničů. Máme celkem čtyři druhy měničů, v této práci budou rozebírány hlavně měniče DC/DC.

- I. **AC/AC** – Tento měnič může měnit velikost střídavého napětí, střídavého proudu a frekvence. Mezi zařízení spadající do této skupiny patří transformátor (schopný měnit velikost napětí a proudu), frekvenční měnič (schopný měnit velikost napětí, proudu a frekvence), dříve se místo frekvenčních měničů využívalo dvou různých střídavých točivých strojů zapojených v soustavě motor-generátor.
- II. **AC/DC** – Usměrňovač je schopný měnit střídavé napětí na stejnosměrné. Mezi zařízení spadající do této skupiny patří usměrňovače neřízené diodové, řízené tyristorové a aktivní tranzistorové. Dále lze usměrnit napětí soustavou točivých strojů AC motor – DC generátor (dynamo)
- III. **DC/AC** – Tranzistorový střídač mění stejnosměrné napětí na střídavé. Dříve se to řešilo soustavou elektrických točivých strojů DC motor – AC generátor
- IV. **DC/DC** – Měnič mění velikost stejnosměrného napětí a proudu. Měniče můžou být jak lineární, tak spínané. Spínané měniče mohou být realizovány pomocí obvodu z diskrétních součástek, nebo pomocí integrovaných obvodů k tomu určených.
 - Lineární měniče dokáží napětí pouze snižovat, vyplývá to z principu jejich funkce. Lineární měnič se chová jako předřadný odpor měnící svou hodnotu podle nějaké regulace, aby zajistil na výstupu nastavené výstupní napětí. Proto jsou na něm značné Joulovy ztráty.
 - Naproti tomu se u spínaných měničů využívá ukládání a odebrání energie z nějakého prvku, který má setrvačnost (cívka, transformátor, kondenzátor). Což způsobí, že můžeme napětí nejen snižovat, ale i zvyšovat. Ztráty budou podstatně menší, protože aktivní prvky jsou provozovány ve spínacím režimu.

výhody	nevýhody
Obvodová jednoduchost zapojení	nízká účinnost
nízká cena součástek	nutnost užití chladičů
vysoké potlačení vlivu kolísání vstupního napětí	velké rozměry, velká hmotnost
nízká hodnota výstupního odporu (dokonce nulová či záporná)	nemožnost izolace vstup – výstup
nízký šum, potlačení např. o 70 dB	nemožnost konverze nahoru

Tabulka 2-1 Výhody a nevýhody lineárních stabilizátorů[3]

2.1 Rozdělení DC/DC měničů

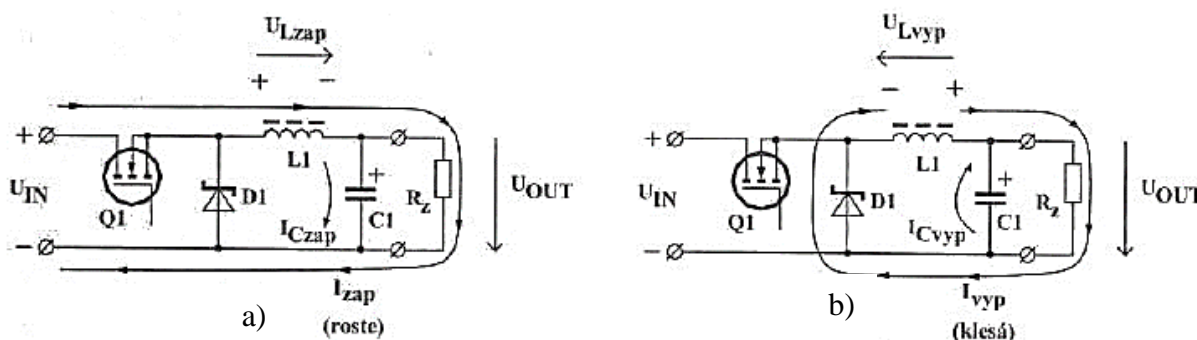
- I. **Měniče s kondenzátory** – Taktéž se jim říká nábojové pumpy. Jejich použití je výhodné zejména pro malé výkony. Díky absenci cívky, nebo transformátoru je nižší pořizovací cena. Změna napětí je způsobená přepínáním kondenzátorů. Toto přepínání můžeme dosáhnout řídicím obvodem se spínačem. Je nutné podotknout, že tento typ měniče nedokáže galvanicky oddělit výstup od zdroje.
- II. **Měniče s cívkami** – Používají se pro větší výkony, než měniče s kondenzátorem a pokud není požadavek na galvanické oddělení výstupního napětí od vstupního napětí.

- III. **Měniče s transformátory** – Používají se pro větší výkony, než měniče s cívkami, anebo pokud je požadavek na galvanické oddělení vstupního napětí od výstupního napětí.[3]

2.2 Zapojení DC/DC měničů

2.2.1 Snižující měnič (buck, step down)

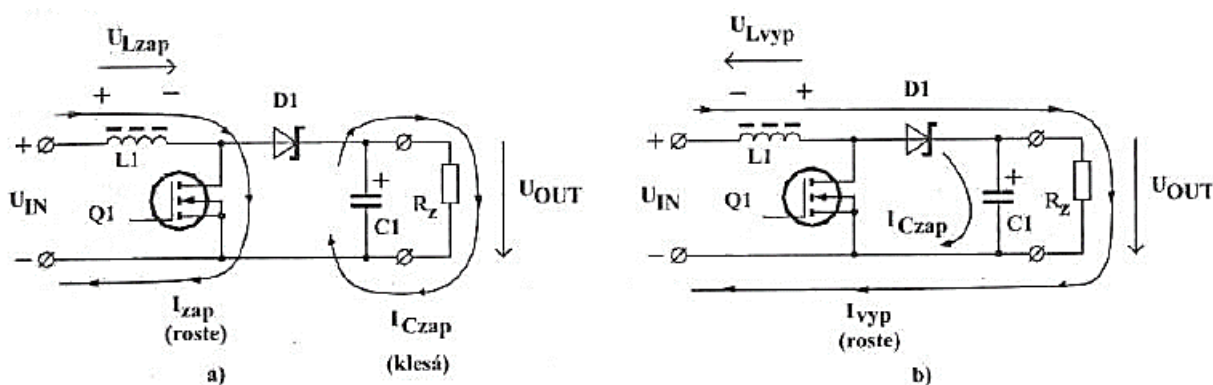
Střída sepnutí tranzistoru se pohybuje v rozsahu 0 % - 100 %. U tohoto zapojení není galvanicky oddělen výstup od vstupu. Zapojení se používá do výkonu stovek wattů. Při sepnutém tranzistoru Q1 protéká proud nabíjejecí kondenzátor a proud tekoucí do zátěže skrze cívku L1. Tato cívka má jistou setrvačnost týkající se proudu, protékající proud se nemění skokově. Rostoucí hodnota proudu ukládá energii do magnetického pole cívky. Při rozepnutí tranzistoru Q1 se cívka brání skokové změně proudu a indukuje na sobě napětí o opačné polaritě, aby se proud obvodem skokově nezměnil (cívka se změní ze spotřebiče energie na zdroj energie). Díky Schottkyho diodě se uzavře obvod, kterým protéká proud generovaný cívkou z jejího magnetického pole. Do zátěže teče nejen proud generovaný cívkou, ale také proud z kondenzátoru. Hodnota proudu cívkou při sepnutém tranzistoru Q1 roste a při vypnutém tranzistoru Q1 klesá. Maximální výstupní napětí je rovno napětí vstupnímu při střídě 100 % (trvale sepnutý tranzistor Q1). Zapojení na obr. 2-1 zajišťuje snížení vstupního napětí U_{IN} . [3]



Obr. 2-1 Snižující měnič: a) tranzistor $Q1$ sepnut, b) tranzistor $Q1$ rozepnut [3]

2.2.2 Zvyšující měnič (boost, step up)

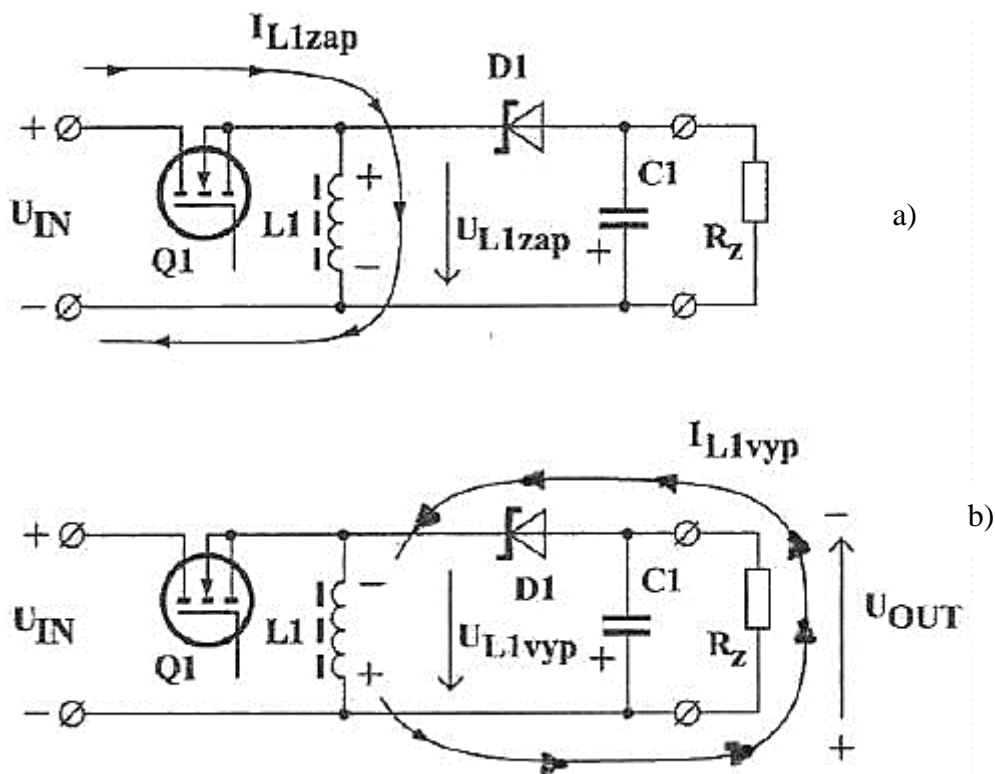
U tohoto zapojení není galvanicky oddělen výstup od vstupu. Při sepnutí tranzistoru Q1 je na cívku L1 přivedeno konstantní napětí, které způsobí lineární růst proudu cívkou. Cívka se nyní chová jako spotřebič a ukládá elektrickou energii do svého magnetického pole. Zároveň je dioda D1 polarizovaná v závěrném směru tudíž nedochází k vybíjení kondenzátoru. Při rozepnutí tranzistoru Q1 se z cívky L1 stává zdroj elektrické energie, kterou uložila do svého magnetického pole. Na cívce se indukuje napětí o opačné polaritě a takové velikosti, aby se skokově nezměnil proud skrze cívku L1. Proud přes D1 nabíjí výstupní kondenzátor. Proud tekoucí skrze cívku L1 teče skrze diodu D1 a dále se dělí na proud nabíjející kondenzátor C1 a proud tekoucí do zátěže R_Z . Při rozepnutém tranzistoru Q1 neprotéká proud skrze diodu D1 a proud do zátěže R_Z zajišťuje energie uložená v kondenzátoru C1. Minimální hodnota napětí na výstupu je rovno vstupnímu napětí a je při vstupní střídě 0 % (trvale rozepnutém tranzistoru). Zapojení na obr. 2-2 zajišťuje zvýšení vstupního napětí U_{IN} . [3]



Obr. 2-2 Zvyšující měnič: a) tranzistor Q1 sepnut, b) tranzistor Q1 rozepnut [3]

2.2.3 Invertující měnič

Při sepnutí tranzistoru Q1 je na cívku L1 přivedeno konstantní vstupní napětí, které způsobí lineární růst proudu. Dioda D1 je nyní zapojena v závěrném směru (neprochází přes ni žádný proud). Cívka L1 se chová jako spotřebič a akumuluje ve svém magnetickém poli energii. Při rozepnutém tranzistoru Q1 se z cívky stává zdroj a snaží se zachovat stejný proud. Na cívce L1 se indukuje napětí o opačné polaritě, díky čemuž je na diodě D1 napětí v propustném směru a začne téct proud z cívky L1 do kondenzátoru C1 a zátěže R_Z . Při sepnutém tranzistoru Q1 teče do zátěže R_Z proud z uložené energie v kondenzátoru C1. Zapojení na obr. 2-3 změní polaritu a velikost vstupního napětí U_{IN} . [3]



Obr. 2-3 Invertující měnič: a) tranzistor $Q1$ sepnut, b) tranzistor $Q1$ rozepnut[3]

2.2.4 Akumulující měnič (flyback)

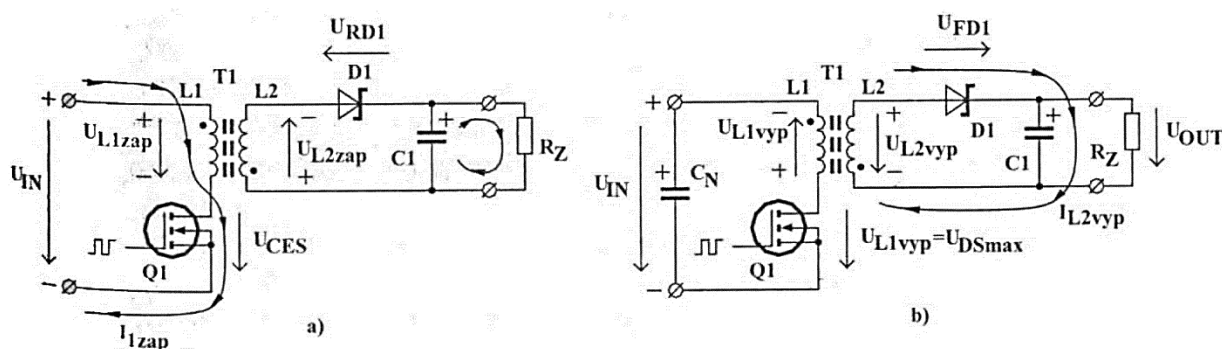
Toto zapojení je nejjednodušší zapojení měniče s transformátorem. Díky použitému transformátoru galvanicky odděluje vstup od výstupu. Při rozepnutí tranzistoru $Q1$ se na cívce $L1$ indukuje napětí, které se přičítá k napětí vstupnímu a může dojít ke zničení tranzistoru $Q1$. Proto musí být tranzistor $Q1$ chráněn proti přepětí. Taktéž musí být tranzistor $Q1$ chráněn proti přepětí díky vlastnosti transformátoru, která se nazývá rozptylová indukčnost. Rozptylová indukčnost znamená, že ne všechny siločáry magnetického pole cívky $L1$ prochází cívkou $L2$. V těchto siločarách je jisté množství energie, kterou neodčerpáme sekundárním vinutím. Tuto energii musíme zmařit na ochranách tranzistoru $Q1$, jinak by došlo ke zničení tranzistoru $Q1$. Střída pro toto zapojení se obvykle používá do 50 %. Zapojení se používá do výkonu 200 W.

Sepnutí tranzistoru $Q1$ přivede na cívku $L1$ napájecí napětí. Při konstantním napájecím napětí roste proud na cívce $L1$ lineárně a akumuluje tak magnetické pole v okolí cívky $L1$, intenzita tohoto magnetického toku roste také lineárně, pokud není jádro transformátoru přesyceno. Jelikož je cívka $L2$ navinutá na stejném jádře jako cívka $L1$ tak se na ní indukuje napětí stejné jako na cívce $L1$ (vliv lineárně rostoucího magnetického pole). Napětí indukované na cívce $L2$ polarizuje diodu $D1$ závěrným směrem, tudíž nedochází k vedení proudu a akumulovaná energie zůstává v magnetickém poli transformátoru. Aby byla dioda $D1$ polarizována závěrně, musí být cívka transformátoru zapojena, nebo navinuta naopak než cívka $L1$. Při rozepnutí tranzistoru $Q1$ se obě cívky transformátoru stávají zdrojem energie, snaží se zachovat stejný proud, ale otočí se jim polarita napětí. Přes cívku $L1$ díky rozepnutému tranzistoru $Q1$ nemůže protékat proud. Cívka $L2$ má na sobě nyní indukované napětí, které polarizuje diodu $D1$ do propustného směru, díky čemuž začne procházet proud obvodem. Část tohoto proudu nabíjí

kondenzátor C1 a část proudu teče do zátěže R_Z . Při sepnutém tranzistoru Q1 neprochází přes diodu D1 žádný proud z cívky L2 a do zátěže teče pouze proud z akumulované energie v kondenzátoru C1.

Při zanedbání rozptylové indukčnosti lze objem magnetického materiálu vypočítat pomocí množství energie, kterou potřebujeme přenést. Množství energie W_{Tr} je závislé na přenášeném výkonu skrze transformátor P_{OUT} a na frekvenci spínání f_s . [3]

$$W_{Tr} = \frac{P_{OUT}}{f_s} \quad (2.1)$$

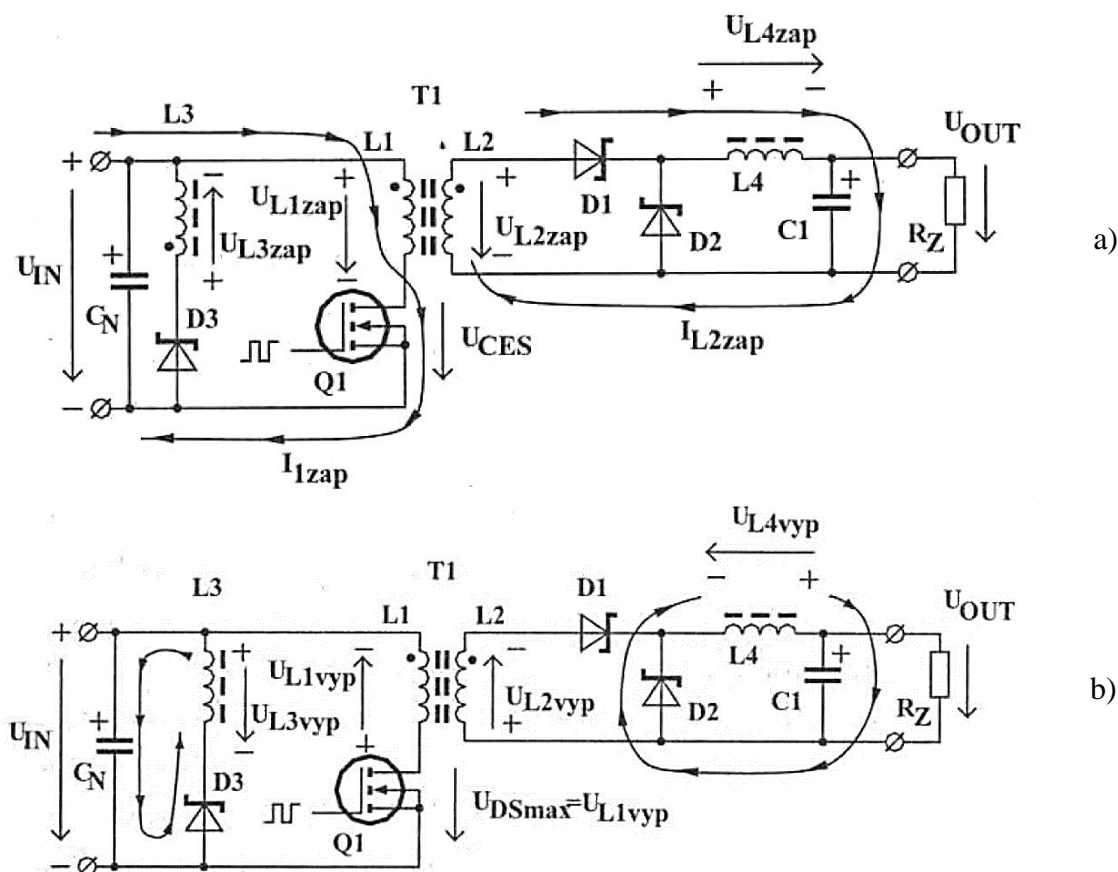


Obr. 2-4 Akumulující měnič: a) tranzistor Q1 sepnut, b) tranzistor Q1 rozepnut [3]

2.2.5 Propustný měnič (forward)

Toto zapojení odebrává energii z magnetického pole transformátoru při sepnutém tranzistoru Q1. Oproti předchozímu zapojení není potřeba tak veliký transformátor, protože není potřeba veškerou přenášenou energii akumulovat v magnetickém poli transformátoru. Dále je návrh transformátoru složitější kvůli nelineárnímu odebrání energie v čase. Při vypnutí tranzistoru Q1 zůstává v transformátoru jisté množství energie, které je bez ochrany schopné zničit tranzistor Q1. Aby nebyla příliš snížena účinnost obvodu, lze použít např. rekuperační vinutí, které odvede zbylou energii v transformátoru zpět do kondenzátoru C_N. Zapojení zajišťuje galvanické oddělení výstupu od vstupu.

Při sepnutí tranzistoru Q1 se přivede konstantní napájecí napětí na cívku L1. Toto napětí způsobí lineární nárůst magnetického pole, a to indukuje napětí na cívkách L2. Primární vinutí L1 a sekundární vinutí L2 jsou zapojeny začátky vinutí tak, aby při sepnutí Q1 byla dioda D1 polarizována v propustném směru. Kvůli tomu teče proud z cívky L2 přes diodu D1 do cívky L4. Dále se proud tekoucí skrze diodu D1 dělí na proud nabíjející kondenzátor C1 a proud tekoucí do zátěže R_Z . Proud přes cívku L4 v cívkách akumuluje energii. Při rozepnutí tranzistoru Q1 se na cívkách L2 indukuje napětí, které polarizuje diodu D1 do závěrného stavu. Z cívky L4 a kondenzátoru C1 se stávají zdroje a dodávají proud do zátěže R_Z . Proud z cívky L4 je uzavírán přes diodu D2 polarizovanou napětím cívky v propustném směru. Nahromaděná energie z transformátoru se indukuje do rekuperačního vinutí L3. Napětí na cívkách L3 polarizuje diodu D3 v propustném směru, díky čemuž může proud z cívky L3 dobít kondenzátor C_N. [3]



Obr. 2-5 Propustný měnič: a) tranzistor Q1 sepnut, b) tranzistor Q1 rozeprnut[3]

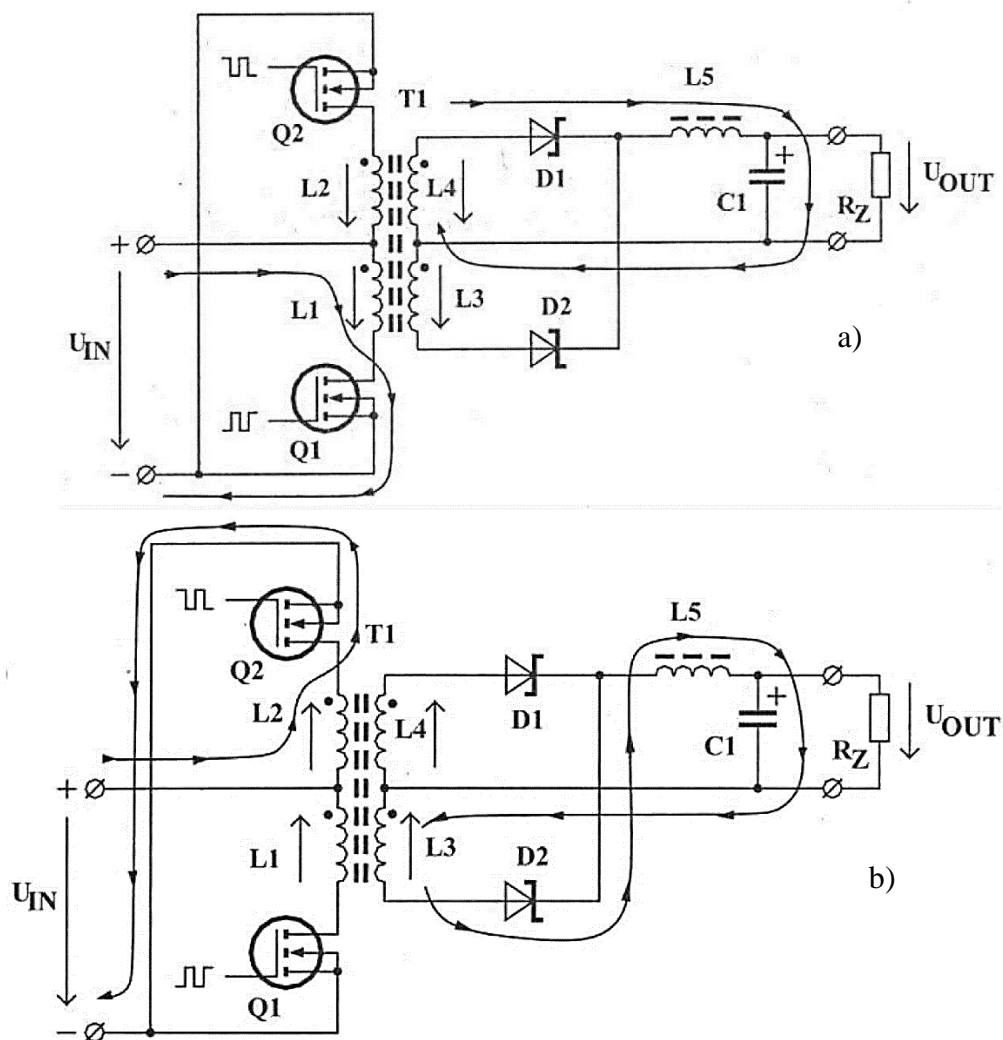
2.2.6 Měnič v zapojení push-pull

Toto zapojení je spojením dvou propustných měničů, které mají společný magnetický obvod. Tranzistory Q1 a Q2 pracují v proti fázi, díky jejich spínání se mění směr proudu vinutím a tím pádem se mění i směr magnetizace jádra transformátoru. K přenosu výkonu je tudíž oproti jednočinným měničům využita celá hysterezní smyčka feromagnetického materiálu, z něhož je tvořeno jádro. U jednočinných měničů je využita pouze polovina hysterezní smyčky feromagnetického materiálu, tudíž u dvojitých měničů je možné zmenšit objem jádra transformátoru na polovinu. Můžeme použít čtyřikrát menší indukčnost cívky L5 díky dvojnásobnému kmitočtu zvlnění proudu, což znamená zmenšení cívky při zachovaném proudu anebo zvětšení proudu při zachování velikosti cívky. Zapojení se používá pro vyšší výkony.

Při sepnutém tranzistoru Q1 a rozeprnutém tranzistoru Q2 se přivede napájecí napětí na cívku L1. Tranzistor Q2 je nyní namáhán součtem dvou napětí, a to napětí zdroje a napětí, které bylo naindukováno na cívku L2. Naindukované napětí na cívce L3 polarizuje diodu D2 do závěrného směru a dioda D2 je tak namáhána tímto napětím. Napětí naindukované na cívce L4 polarizuje diodu D1 do propustného směru. Diodou D1 začne díky naindukovanému napětí na cívce L4 procházet proud. Tento proud poté prochází cívkou a dělí se na proud nabíjející kondenzátor a proud jdoucí do zátěže.

Při sepnutém tranzistoru Q2 a rozeprnutém tranzistoru Q1 se přivede napájecí napětí na cívku L2. Tranzistor Q1 je nyní namáhán součtem dvou napětí, a to napětí zdroje a napětí, které bylo naindukováno na cívku L1. Naindukované napětí na cívce L4 polarizuje diodu D1 do závěrného

směru a dioda D1 je tak namáhána tímto napětím. Napětí naindukované na cívce L3 polarizuje diodu D2 do propustného směru. Diodou D2 začne, díky naindukovanému napětí na cívce L3, procházet proud. Tento proud poté prochází cívkou a dělí se na proud nabíjející kondenzátor a proud tekoucí do zátěže.[3]



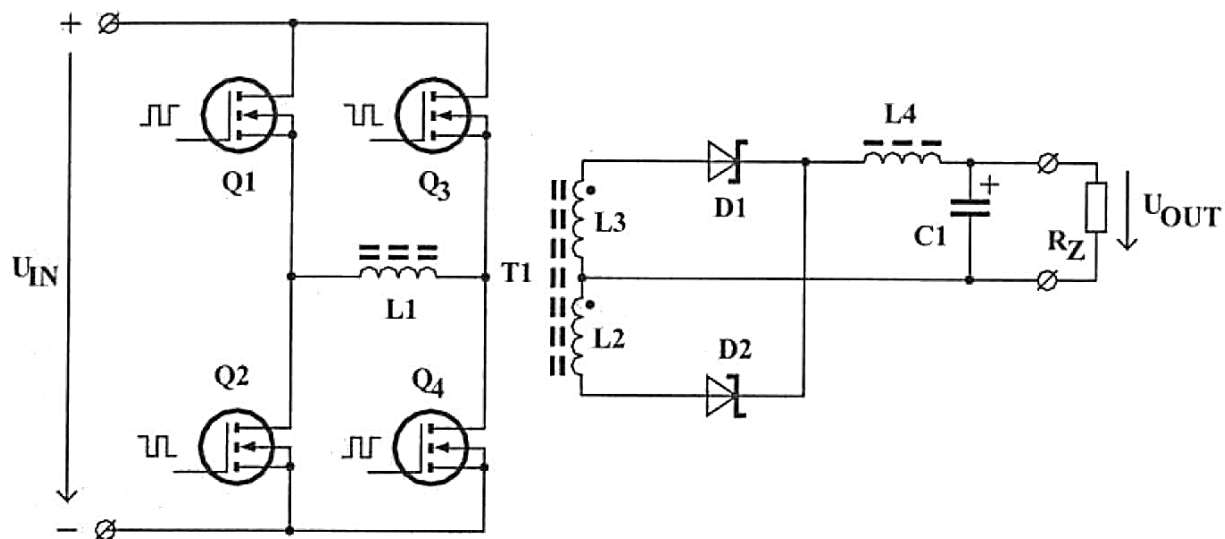
Obr. 2-6 Push-pull měnič: a) tranzistor $Q1$ sepnut a tranzistor $Q2$ rozepnut, b) tranzistor $Q1$ rozepnut a tranzistor $Q2$ sepnut [3]

2.2.7 Měnič v zapojení plný most

Toto zapojení je již složitější díky složitějšímu buzení jednotlivých tranzistorů, nutnosti elektrické izolace chladičů jednotlivých tranzistorů a také kvůli nutnosti použití takzvaného dead time, aby nemohlo dojít k sepnutí dvou tranzistorů nad sebou v jednom okamžiku. Toto sepnutí by mělo za následek zkratování napájecího napětí a zničení sepnutých tranzistorů. Zapojení je výhodné použít při výkonech větších než 500 W.

Zapojení využívá celou hysterezní smyčku feromagnetického jádra spínáním jednotlivých tranzistorů tak, aby na cívku přiváděli pokaždé napájecí napětí o jiné polaritě. Odpadá tedy nutnost vinout primární vinutí s vyvedeným středem jako u zapojení push-pull. V první části se sepnou tranzistory $Q1$ a $Q4$ a přivedou na cívku L1 napájecí napětí. Poté se tranzistory $Q1$ a $Q4$ rozepnou a po uplynutí tzv. dead time se sepnou tranzistory $Q2$ a $Q3$, na cívku se tímto způsobem

přivede záporné napájecí napětí. Poté se tranzistory Q2 a Q3 rozeznou a po uplynutí dead time se znovu spínají tranzistory Q1 a Q4.[3]



Obr. 2-7 Měnič v zapojení plný most[3]

3 SYNCHRONNÍ STROJE

Synchronní stroje můžou být jednofázové, nebo trojfázové. Jak již název napovídá, rotor motoru se otáčí synchronními otáčkami, rotor se otáčí spolu s rotujícím magnetickým polem statoru bez rozdílu otáček (skluzu). Trojfázové synchronní stroje jsou často používány jako generátory, kdy na statoru je trojfázové vinutí, z něhož je odebírán výkon. Na rotoru bývá budící vinutí, které je napájeno skrze kroužky. Místo budícího vinutí můžeme použít i permanentní magnety, ale přijdeme tím o možnost měnit buzení generátoru a tím regulovat jeho napětí.[4]

Frekvence výstupního napětí synchronního generátoru je dána vztahem:

$$f = \frac{n \cdot p}{60} \quad (3.1)$$

Kde n [1/min] jsou otáčky stroje 1/min, f [Hz] je frekvence indukovaného napětí stroje a p je počet pólových dvojic.

3.1 Cyklistické dynamo

Používá se pro výrobu elektrické energie při jízdě na kole. Název dynamo je trochu matoucí, protože jako dynamo se označují elektrické točivé stejnosměrné stroje. Cyklistické dynamo je elektrický točivý stroj, ale není stejnosměrný. Cyklistické dynamo je vlastně synchronní generátor s permanentními magnety, kdy magnety jsou na rotoru a vinutí na statoru, díky tomu se jedná o spolehlivé zařízení, kde nejsou ani kroužky ani komutátor. Jediné, co je nutné měnit, kvůli opotřebení jsou ložiska.

Protože se cyklistické dynamo dříve používalo jako zdroj elektrické energie pro žárovky, bylo vhodné, aby mělo poměrně velkou indukčnost. Tato indukčnost se projevuje při rychlejší jízdě (vyšší frekvenci napětí). Je to kvůli tomu, že vnitřní impedance cyklistického dynamo je dána odporem a induktancí jeho vlnutí. Reaktance je přímo závislá na frekvenci, a proto vnitřní impedance dynamo lineárně roste s frekvencí (otáčkami). Zároveň s tím lineárně roste indukované napětí. Dynamo se tedy chová jako zdroj proudu (cca 0.5 A). Induktanci cyklistického dynamo lze dostatečně zmenšit sériově vloženým kondenzátorem o vhodné kapacitanci tak, aby z impedance dynamo zbyla jen jeho reálná část (odpor vlnutí). Díky měnící se frekvenci napětí generované cyklistickým dynamem se mění hodnota vhodné kompenzační kapacity, a to nepřímou úměrou s druhou mocninou frekvence. Při použití dvou vhodné přepínaných kondenzátorů to bude znamenat, že při většině případů bude induktance potlačena pouze částečně, ale i to bude dostačující. Pro jednotlivé frekvence můžeme vypočítat vhodnou velikost kapacity kondenzátoru dle vztahu:

$$C = \frac{1}{\omega^2 \cdot L} \quad (3.2)$$

4 MPPT

MPPT – Maximum Power Point Tracking česky sledování bodu maximálního výkonu.

Každý zdroj má nějakou výkonovou charakteristiku, pokud zdroj nedokážeme řídit a ukládáme energii např. do li-ion akumulátorů je vhodné pro zvýšení využití zdroje použít nějaký algoritmus zajišťující MPPT. MPPT algoritmy se využívají hlavně u solárních panelů, nebo malých (domácích) větrných elektráren ukládajících energii do baterií. U fotovoltaických panelů je bod maximálního výkonu hodně závislý na osvětlení panelu. Pokud chceme z nějakého zdroje napětí získat co největší výkon, musí být velikost odporu v zátěži rovna vnitřnímu odporu zdroje. Pokud je odpor v zátěži menší, než je odpor zdroje, poté klesá odebíraný výkon a roste výkon ztrátový na vnitřním odporu zdroje, což vede ke zvýšení namáhání zdroje. Pokud je naopak odpor v zátěži větší, než je odpor zdroje, poté odebíraný výkon klesá, ale klesá také namáhání zdroje.

5 MĚŘENÍ CYKLISTICKÉHO DYNA

Cyklistické dynamo bylo měřeno na přípravku na obrázku obr. 5-4. Přípravek se skládá z měřeného cyklistického dynama, jenž je připevněno pomocí hliníkových L profilů na plastovou desku. Na plastové desce je také připevněn DC motor k pohánění cyklistického dynama. Pro přenos hnací síly je v přípravku použit plochý ozubený řemen s označením T5. Na motoru je připevněna ozubená řemenice s typem zubu T5, tato řemenice má celkem 9 zubů a byla vytištěna na 3D tiskárně z materiálu PLA. Pro cyklistické dynamo byla navrhnutá řemenice o 55 zubech, a taktéž byla tato řemenice vytištěna na 3D tiskárně z materiálu PLA. Použitý DC motor byl odborně vypreparován ze staré akumulátorové vrtačky. První měření proběhlo pro stav naprázdno, hodnoty z měření jsou uvedeny v Tabulce 5-1.

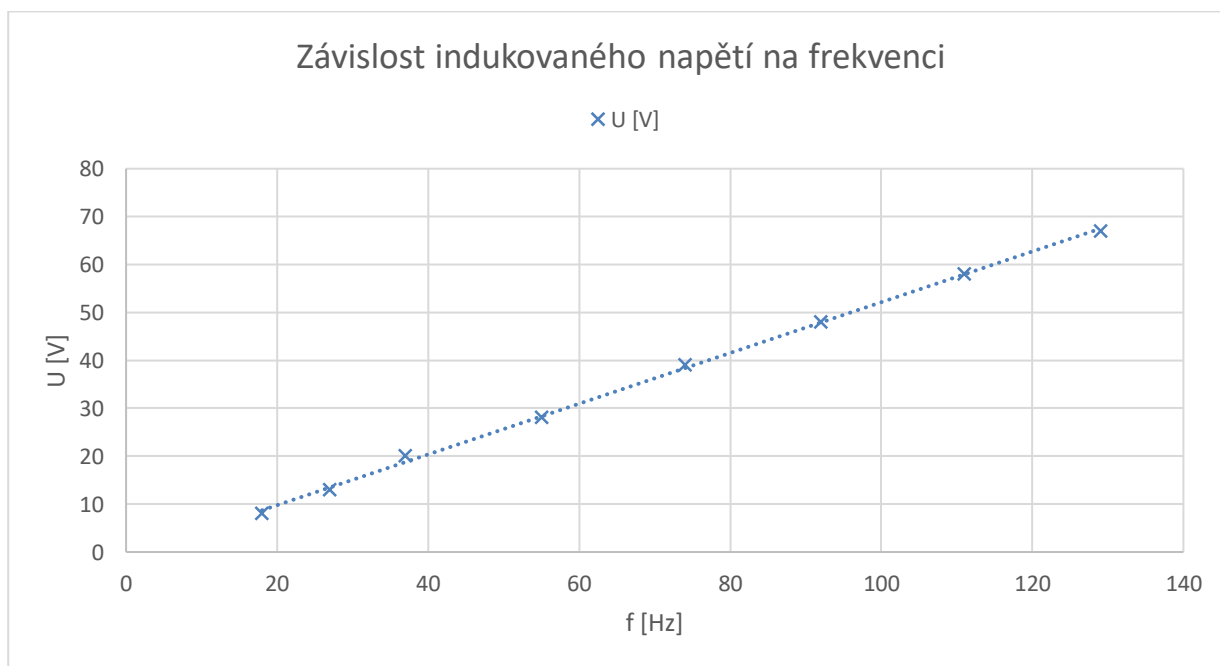
v [km/h]	10	15	21	31	42	53	63	74
f [Hz]	18	27	37	55	74	92	111	129
U [V]	8	13	20	28	39	48	58	67

Tabulka 5-1 Cyklistické dynamo měření naprázdno

Udávaná rychlost jízdního kola byla vypočtena pro jízdní kolo s průměrem kola $d = 26''$. Pro vypočtení rychlosti jízdního kola byly využity vzorečky pro obvod kola, vztah pro výpočet otáček synchronního stroje v závislosti na počtu pólových dvojic a frekvenci, a převodní vztah mezi palcem a metrem. Počet pólových dvojic u měřeného cyklistického dynama byl určen na $p = 13$. Příklad výpočtu pro první sloupec Tabulky 5-1.

$$v = n \cdot o = \frac{3,6 \cdot f \cdot \pi \cdot 26 \cdot 0,0245}{p} = \frac{3,6 \cdot 18 \cdot \pi \cdot 26 \cdot 0,0245}{13} \quad (5.1)$$

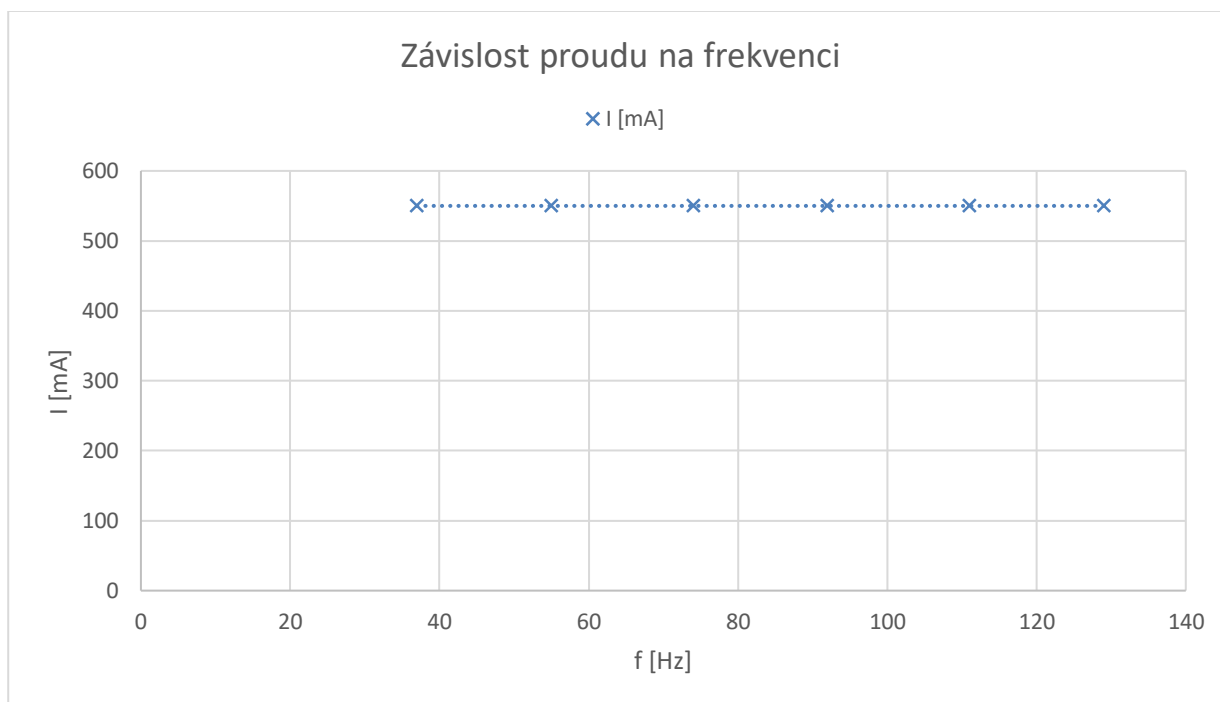
$$v = 9,98 \text{ km/h}$$



Obr. 5-1 Závislost indukovaného napětí na frekvenci

v [km/h]	21	31	42	53	63	74
f [Hz]	37	55	74	92	111	129
I [mA]	550	550	550	550	550	550

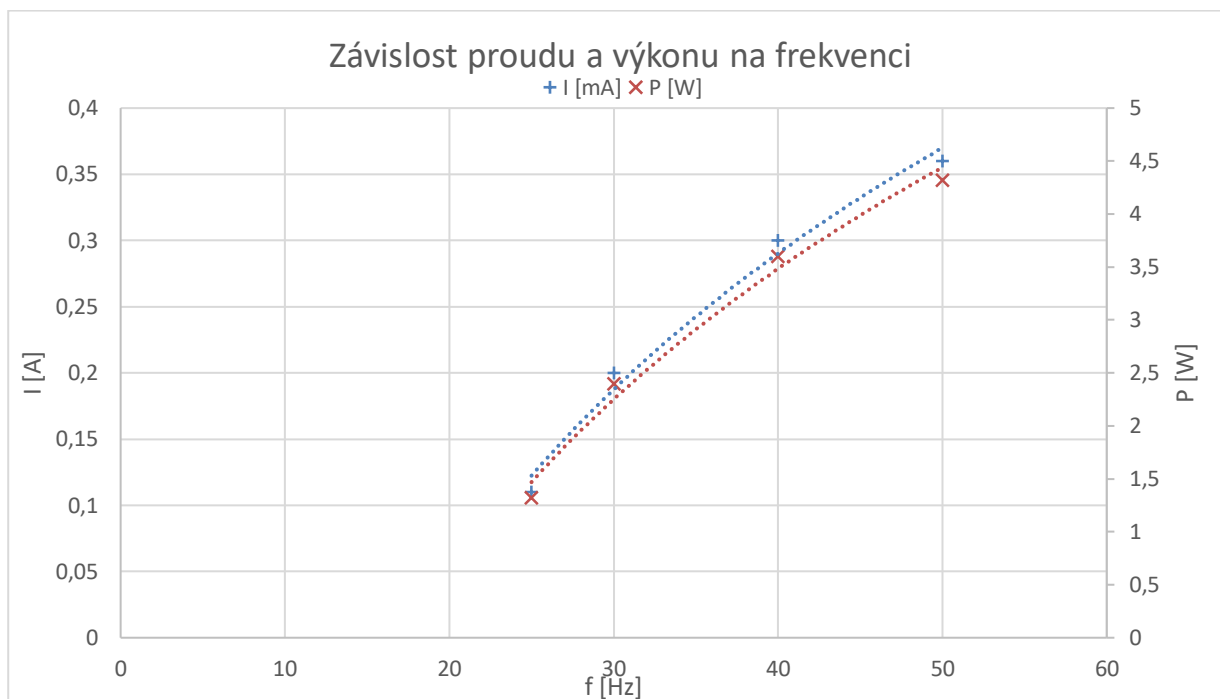
Tabulka 5-2 Cyklistické dynamo měření nakrátko



Obr. 5-2 Závislost proudu nakrátko na frekvenci

v [km/h]	14	17	23	29
f [Hz]	25	30	40	50
U [V]	12	12	12	12
I [mA]	0,11	0,2	0,3	0,36
P [W]	1,32	2,4	3,6	4,32

Tabulka 5-3 Měření výkonové charakteristiky cyklistického dynama při konstantním napětí



Obr. 5-3 Závislost proudu a výkonu na frekvenci při konstantním napětí

Při měření závislosti odebíraného výkonu a proudu na frekvenci byl zapojen MPPT regulátor. Regulátor při měření udržoval konstantní napětí 12 V.

Indukčnost cyklistického dynama byla změřena pomocí RLC multimetru na průměrnou hodnotu 80 mH. Indukčnost je značně závislá na úhlu natočení. Odpor vinutí o hodnotě 3 Ω byl změřen pomocí RLC multimetru.

Indukčnost lze vypočítat dle vztahu:

$$L = \frac{\sqrt{Z^2 - R^2}}{\omega} = \frac{\sqrt{\left(\frac{U_i}{I_k}\right)^2 - R^2}}{\omega} = \frac{\sqrt{\left(\frac{K \cdot f}{I_k}\right)^2 - R^2}}{\omega} \quad (5.2)$$

$$= \frac{\sqrt{\left(\frac{0,5083 \cdot 129}{0,55}\right)^2 - 3^2}}{2 \cdot \pi \cdot 129} = 0,147 \text{ H}$$

Kde U_i je indukované napětí, I_k je proud nakrátko z tabulky 5-2, K je konstanta pro výpočet indukovaného napětí z frekvence.



Obr. 5-4 Přípravek pro odměření charakteristik cyklistického dynama

6 NÁVRH MĚNIČE

Při návrhu měniče si musíme nejdříve určit, co od měniče požadujeme. V tomto případě není nutné galvanické oddělení. Galvanické oddělení by bylo nutností v případě, pokud by byl požadavek na zamezení úrazu, anebo třeba, aby nedošlo k vytvoření zemních smyček.

Po měniči bude požadováno snížení napětí na úroveň vhodnou pro nabíjení li-ion akumulátorů, tudíž maximálně 4,2 V z napětí generovaného cyklistickým nábojovým dynamem, jehož napětí je závislé na rychlosti jízdy a je v intervalu 0 V – 50 V bez zatížení. Se zatížením bude jistě konečné napětí dynama menší.

Pro výrobek jsem si tedy zvolil snižující měnič.

6.1 Bočník

Principiálně se jedná o nejjednodušší měření proudu. Pokud známe hodnotu odporu bočníku a změříme si úbytek napětí na tomto bočníku jsme schopni podle Ohmova zákona spočítat proud tekoucí měřeným obvodem. Hodnotu odporu bočníku je vhodné volit takovou, aby příliš neovlivňoval měřený obvod. Proto hodnotu bočníku volíme tak, aby při maximálním proudu obvodem byl úbytek napětí na bočníku mnohem menší než napětí na zátěži, tím se sníží i výkonové ztráty na bočníku. Pokud je galvanicky oddělen měřicí obvod od měřeného, můžeme bočník vložit na libovolné místo v obvodu a připojit k němu zem měřicího obvodu. Pokud ovšem je měřicí a měřený obvod galvanicky propojen vkládá se bočník vůči zemi. Mohl by se vložit i jinam a pomocí rozdílového zapojení operačního zesilovače by se velikost měřeného signálu projevila vůči zemi.

Signál z bočníku se musí filtrovat, dostačující je dolní propust 1. řádu např. RC. Pro správnou regulaci měniče a včasný zásah nadproudové ochrany je potřeba mít časovou konstantu RC článku nanejvýše 10 μ s. Čím větší máme indukčnost tlumicí cívky, tím větší časovou konstantu si můžeme dovolit. Toto je možné díky tomu, že se zvyšující se indukčností se snižuje rychlost nárůstu proudu. „Pro zabezpečení požadované časové konstanty filtru RC se vždy volí raději menší odpor a větší kapacita (typicky odpor desítky až stovky Ω , kapacita jednotky až desítky nF). Hovoříme o tzv. stavbě obvodů „na malé impedanci“ – malý odpor i malá reaktance kondenzátoru s velkou kapacitou.“[1]

Napěťový výstup z bočníku má malou velikost, proto je nutné ho zesílit, pro velké zesílení je vhodné použít dva operační zesilovače. První z nich by měl být nízko šumový s malým offsetem, aby nedocházelo k velkému zkreslení. Druhý zesilovač v pořadí by měl být rychlý a není u něj až tak velký požadavek na nízký šum a malý offset jako u prvního. Zesílení obou zesilovačů by mělo být stejné. [1]

6.2 Měření napětí

Při snímání napětí je využito napěťového děliče, na jehož výstup je vložen kondenzátor, tím vznikne RC filtr dolní propusti prvního řádu. Využití filtru je nutné kvůli možnosti zarušení snímaného napětí různými jevy (nekvalitní kondenzátor, indukování napětí v měděném spoji...).

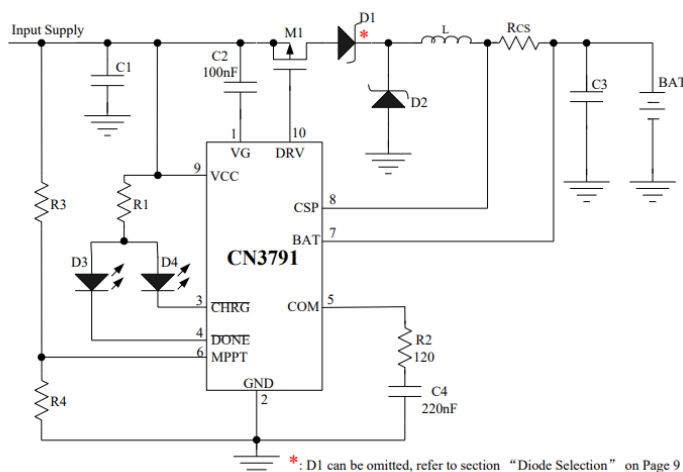
Pro správnou regulaci měniče a včasný zásah přepětové ochrany je potřeba mít vhodně zvolenou časovou konstantu RC článku.[1]

6.3 Zvolený mikroprocesor pro řízení

Jako ovládací prvek řídící připínání kondenzátorů a starající se o výpočty pro MPPT regulátor jsem si zvolil mikroprocesor ATmega328P vyráběný firmou Atmel. Je to 8bitový mikroprocesor, který může pracovat v rozsahu napájecího napětí 1,8 V – 5,5 V. Na napájecím napětí je závislá pracovní frekvence mikroprocesoru, která je při 4,5 V – 5,5 V 16 MHz. Má 8 analogových vstupních pinů, jednotlivé piny jsou přivedeny na multiplexor a ten je střídavě připíná k jednomu 10bitovému A/D převodníku s postupnou aproximací. Dále má 14 digitálních I/O pinů. Mezi těmito piny je 6 pinů schopných generovat 8bitový PWM signál. Maximální stejnosměrný proud přes digitální pin je 20 mA. Mikroprocesor má 32 kB flash paměti, 0,5 kB zabírá bootloader zbytek je pro samotný program psaný třeba v arduino IDE, dále má 2 kB paměti SRAM a 1 kB paměti EEPROM.[5]

Zvolil jsem si čínskou kopii vývojové platformy Arduino Nano. Oproti originálu se liší pouze jiným převodníkem pro komunikaci ATmega328P s počítačem, tento převodník se nazývá CH340G. Dále se liší cenou, tyto kopie se v čínských obchodech prodávají za cenu okolo 80 Kč ve slevě i 40 Kč, pro srovnání v obchodě GME stojí pouze samotný mikroprocesor 62 Kč. Na destičce je také lineární stabilizátor na napětí 3,3 V a proud 50 mA.

6.4 Schéma zapojení snižujícího měniče CN3791



Obr. 6-1 Schéma zapojení snižujícího měniče CN3791[6]

6.4.1 Popis zapojení

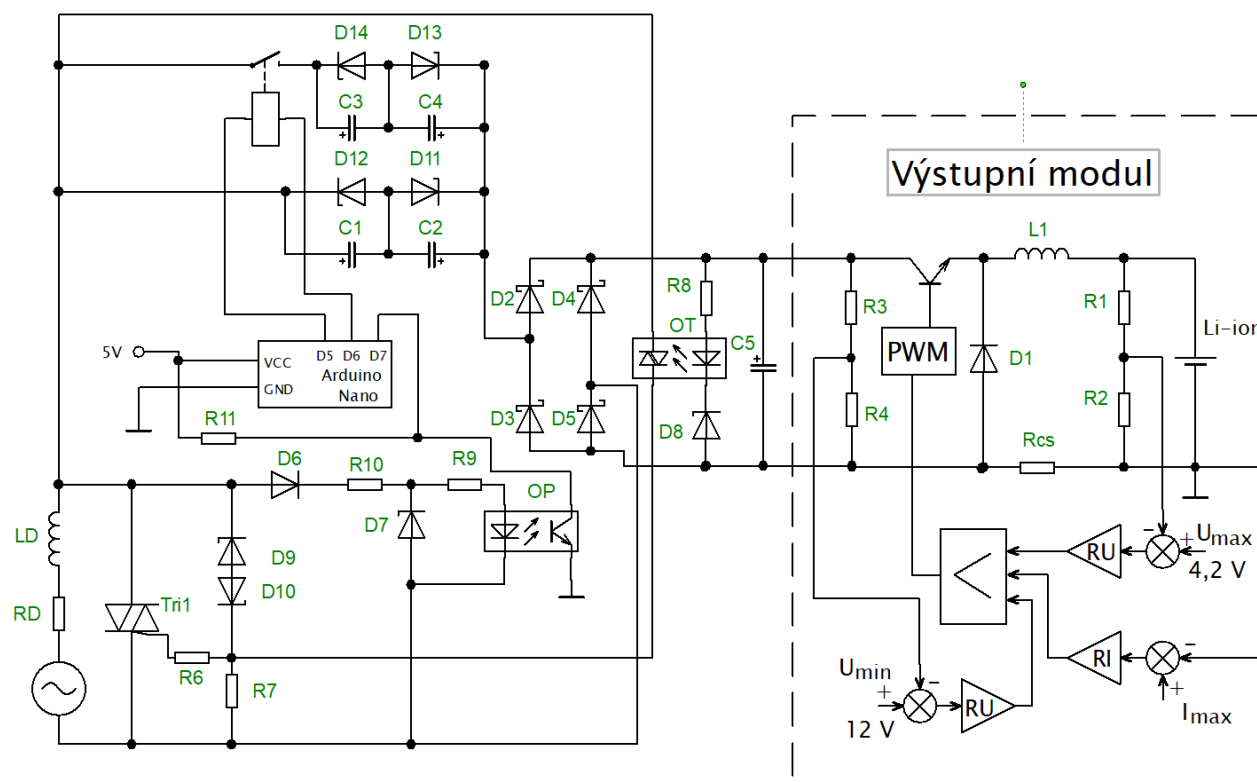
Jako regulátor MPPT pro cyklistické dynamo a zároveň nabíječka Li-ion baterií posloužil obvod CN3791. Tento obvod byl umístěn na již vyrobené čínské destičce. Jedná se o měnič typu Step Down s regulací vstupního napětí, výstupního napětí a výstupního proudu. Maximální výstupní proud (nabíjecí proud baterie) I_{CH} se nastaví bočníkem R_{CS} .

$$I_{CH} = \frac{0,12}{R_{CS}} \quad (6.1)$$

Signál z bočníku se přivede na pin CSP. Výstupní napětí si obvod reguluje na maximální napětí 4,2 V. Vstupní napětí si obvod reguluje tak, aby na pinu MPPT bylo 1,205 V. Toto napětí zajišťuje vstupní dělič napětí. V datasheetu obvodu jsou rezistory pro dělič označeny jako R_3 a R_4 .

$$U_{MPPT} = 1,205 \cdot \left(1 + \frac{R_3}{R_4}\right) \quad (6.2)$$

6.5 Schéma zapojení výrobku



Obr. 6-2 Schéma zapojení pro lepší využití výkonu z cyklistického dynama

6.5.1 Popis zapojení

Při nabití Li-ion baterii vlivem malého odběru výkonu vzroste vstupní napětí MPPT regulátoru. Obvod CN3791 má od výrobce udávané maximální napájecí napětí 28 V. Pokud by došlo k překročení tohoto napětí, tak dojde ke zničení obvodu. Z tohoto důvodu je ve schématu Optotriak, který se sepne, pokud by se napětí přiblížilo ke 28 V. Zenerova dioda D_8 má zenerovo napětí 24 V. Úbytek napětí na diodě optotriaku U_{OMAX} v propustném směru je maximálně 1,5 V a maximální proud I_{OMAX} je 15 mA. Dimenzování zenerovy diody:

$$P_{ZD8} = U_{ZD8} \cdot I_{ZD8} = 24 \cdot 15 \cdot 10^{-3} = 0,36 \text{ W} \quad (6.3)$$

Výkonové ztráty na zenerově diodě jsou 0,36 W, nejbližší vyráběná řada je 0,5W.

Pro dimenzování rezistoru R_8 si určíme maximální dovolené napětí U_{\max} na 27 V. Potom bude napětí na rezistoru U_{R8} dáno vztahem:

$$U_{R8} = U_{MAX} - (U_{OMAX} + U_{ZD8}) = 27 - (1,5 + 24) = 1,5 \text{ V} \quad (6.4)$$

Hodnotu odporu rezistoru spočítáme vztahem:

$$R_8 = \frac{U_{R8}}{I_{OMAX}} = \frac{1,5}{15 \cdot 10^{-3}} = 100 \, \Omega \quad (6.5)$$

Hodnotu ztrátového výkonu rezistoru spočítáme vztahem:

$$P_{R8} = U_{R8} \cdot I_{OMAX} = 1,5 \cdot 0,015 = 0,0225 \text{ W} \quad (6.6)$$

Takže můžeme použít rezistor dimenzovaný na výkonovou ztrátu 0,25 W.

Použité hodnoty U_{OMAX} a I_{OMAX} jsou maximální hodnoty pro sepnutí optotriaku. Proto lze předpokládat, že optotriak sepne při hodnotě napětí za usměrňovačem v rozsahu 24 V až 27 V. Sepnutý optotriak poté přivede napětí na řídicí elektrodu triaku Tri1, který se sepne. Triak je připojen paralelně k cyklistickému dynamu. Tím dojde ke zkratování svorek dynama, proud je omezen indukčností dynama na zhruba 550 mA.

Diody použité v zapojení můstkového usměrňovače jsou schottkyho diody s co nejnižším prahovým napětím, které je 360 mV, závěrným napětím 30 V a v propustném směru zvládne dioda nepřetržitý proud do 5 A. Tyto diody byly vybrány hlavně kvůli nejnižšímu prahovému napětí, a to, aby se zmenšily tepelné ztráty na můstkovém usměrňovači.

Pro kompenzaci indukční složky dynama jsou do série zařazeny kondenzátory C_1 až C_4 . Použité kondenzátory jsou elektrolytické, je to hlavně z důvodu velikosti zařízení. Kvůli použití elektrolytických kondenzátorů v obvodu, ve kterém se vyskytuje střídavé napětí a proud, je nutné tyto kondenzátory řadit dva do série. Jestliže se obvod dostane do rezonance, což je účelem, tak se může vyskytnout vyšší napětí na kondenzátoru, než na který je dimenzován. Z tohoto důvodu je ke každému kondenzátoru zařazena zenerova dioda o parametrech 100 V a 5 W. Pokud by se v obvodu mezi cyklistickým dynamem a kompenzačními kondenzátory C_1 až C_4 objevilo vlivem rezonance vyšší napětí než 100 V, tak se otevrou obě zenerovy diody a pustí proud do řídicí elektrody triaku Tri1, který toto vysoké napětí zkratuje. Kondenzátory C_1 až C_4 byli zvoleny o velikosti 220 μF . Při zapojení kondenzátorů C_1 a C_2 je celková kapacita kompenzující indukčnost 110 μF . Při zapojení kondenzátorů C_1 až C_4 bude celková kapacita kompenzující indukčnost 220 μF . Frekvence, při kterých bude obvod v rezonanci, spočítáme podle Thomsonova vztahu:

$$f_1 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C_{14}}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{80 \cdot 10^{-3} \cdot 220 \cdot 10^{-6}}} = 37,9 \text{ Hz} \quad (6.7)$$

$$f_2 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C_{12}}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{80 \cdot 10^{-3} \cdot 110 \cdot 10^{-6}}} = 53,7 \text{ Hz} \quad (6.8)$$

Kde f_1 a f_2 jsou frekvence, kdy obvod dosáhne rezonance, L je indukčnost cyklistického dynama $L = 80 \text{ mH}$, C_{14} je sérioparalelní kombinace kondenzátorů C_1 až C_4 a C_{12} je sériová kombinace kondenzátorů C_1 a C_2 .

```

1 -   clc
2 -   clear all
3 -   L = 80e-3;
4 -   C14 = 220e-6;
5 -   C12 = 110e-6;
6 -   for f = 37.0:0.1:54.0
7 -       Om = 2*pi*f;
8 -       XL = Om*L;
9 -       XC14 = -1/(Om*C14);
10 -      XC12 = -1/(Om*C12);
11 -      Xt1 = XL + XC14;
12 -      Xt2 = XL + XC12;
13 -      if abs(Xt1) > abs(Xt2)
14 -          break
15 -      end
16 -   end

```

Obr. 6-3 Program pro výpočet optimálního bodu sepnutí

Frekvence, při které se má sepnout relé, byla vypočtena pomocí kódu v Matlabu na 46,5 Hz. Na třetím až pátém řádku si definuji konstanty jako indukčnost cyklistického dynama a jednotlivé kapacity. Cyklus for probíhá od frekvence 37 Hz do frekvence 54 Hz s krokem 0,1 Hz. V jednom průběhu cyklu se spočítá indukance a kapacitance. Dále se spočítá celková impedance zapojení s kapacitou C_{14} a C_{12} . V případě, že absolutní hodnota reaktance s kondenzátorem C_{14} je větší, než s kondenzátorem C_{12} tak se cyklus ukončí. V paměti Matlabu tak zůstane frekvence, při které je vhodné přepnout jednotlivé kapacity.

Pro snímání frekvence a ovládání relé, které připínají a odpínají kompenzační kondenzátory C_1 až C_4 , bylo použito Arduino nano a obvod s optočlenem. U rezistoru R_{11} byla zvolena hodnota odporu na $10 \text{ k}\Omega$. Napětí U_{cc} je napájecí napětí pro arduino, toto napětí má velikost 5 V. Proud spínaný tranzistorem v optočlenu spočítáme jako:

$$I_{R11} = \frac{U_{cc}}{R_{11}} = \frac{5}{10^4} = 0,5 \text{ mA} \quad (6.9)$$

Použité relé v zapojení má napětí cívky 5 V. Napětí 5 V bylo zvoleno kvůli tomu, že toto relé je ovládáno z vývojové desky Arduino Nano schopné mít na výstupu digitálních pinů maximálně 5 V. Výběr relé měl podmínku co nejmenšího odebíraného proudu. Vybrané relé má odpor cívky 357Ω , při použití Ohmova zákona nám vyjde proud 14 mA. Pro spínané kontakty je udáváný maximální proud 2 A, což je dostatečná hodnota. Toto relé je zároveň bistabilní, což je výhoda, která taktéž sníží spotřebu. Díky tomu, že je relé bistabilní je možné poslat pouze impuls a podle polarity impulsu se relé sepne, nebo rozepne. Jistou nevýhodu vidím v nutnosti využít dva digitální výstupy, ale v tomto projektu nebyl problém s počtem digitálních výstupů mikrokontroléru. Pokud by tento problém nastal, tak by šel vyřešit pomocí obvodu rozšiřující vstupy a výstupy. Tyto obvody většinou komunikují pomocí sběrnic SPI nebo I²C.

Zenerovo napětí zenerovy diody D_7 bylo zvoleno $U_{Z8} = 6,8 \text{ V}$ a ztrátový výkon na zenerově diodě byl zvolen 0,5 W. Minimální napětí na cyklistickém dynamu, při kterém bude možné měřit frekvenci bylo zvoleno na $U_{FMIN} = 10 \text{ V}$. Toto napětí bylo zvoleno podle napětí, na které se bude regulovat vstup MPPT regulátoru. Minimální napětí pro měření frekvence bylo zvoleno o 2 V menší kvůli jisté rezervě. U nižšího napětí nemá smysl měřit frekvenci kvůli tomu, že MPPT regulátor neodebírání žádný výkon a není tedy potřeba přepínat kompenzační kondenzátory. Maximální napětí bylo zvoleno na 27 V, a to kvůli ochrannému obvodu popsanému výše. Dioda D_6 je obyčejná usměrňovací dioda s prahovým napětím $U_P = 0,7 \text{ V}$. Napěťový úbytek v propustném směru na diodě spínací fototranzistor je $U_F = 1,3 \text{ V}$. Maximální napětí v závěrném směru na diodě spínací fototranzistor je 6 V. Z grafů v datasheetu byla zvolena hodnota proudu $I_F = 2 \text{ mA}$. Aby nebyla překročena hranice maximálního závěrného napětí je v obvodu zapojena zenerova dioda D_7 , která sníží napětí v závěrném směru na 0,7 V. Tato zenerova dioda D_7 slouží i jako napěťový stabilizátor pro diodu v optočlenu O_P v propustném směru. Odpor R_{10} spočítáme jako:

$$R_{10} = \frac{U_{FMIN} - (U_P + U_{Z8})}{I_F} = \frac{10 - (0,7 + 6,8)}{2 \cdot 10^{-3}} = 1,25 \text{ k}\Omega \quad (6.11)$$

Zvolený nejbližší rezistor v řadě E6 je 1 K Ω . Přepočtení proudu:

$$I_F = \frac{U_{FMIN} - (U_P + U_{Z8})}{R_{10}} = \frac{10 - (0,7 + 6,8)}{10^3} = 2,5 \text{ mA} \quad (6.12)$$

Odpor R_9 spočítáme jako:

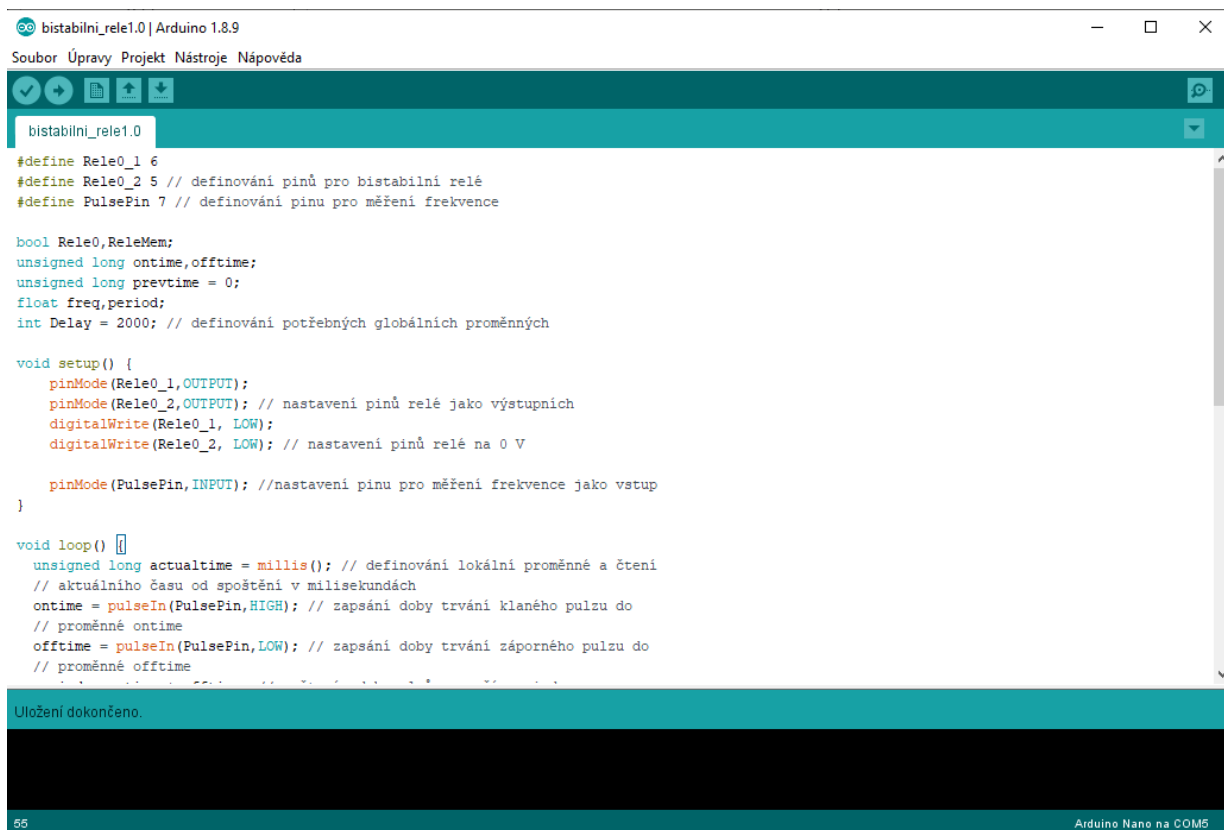
$$R_9 = \frac{U_{Z8} - U_F}{I_F} = \frac{6,8 - 1,3}{25 \cdot 10^{-4}} = 2,2 \text{ k}\Omega \quad (6.13)$$

6.6 Algoritmus pro řízení připínání kapacity

Samotný algoritmus funguje tak že, se měří frekvence a podle ní se připne, nebo odepne jeden kompenzační kondenzátor. Pokud je změřená frekvence nižší než 47 Hz tak se kondenzátor připne. Pokud je frekvence vyšší než 47 Hz tak se kondenzátor odepne.

6.6.1 Vývojové prostředí

Pro psaní kódu bylo použito vývojové prostředí Arduino IDE verze 1.8.9. Programovací jazyk pro toto prostředí je C++ s množstvím knihoven. V prostředí lze psát program i bez využití knihoven. Využívání knihoven má výhody v rychlejší psaní kódu. Další výhodou je skutečnost, že napsaný kód je možné spustit na různých platformách Arduina s mnohdy jinými mikrokontroléry. Nevýhodu vidím v tom, že díky této univerzálnosti a jednoduchosti nebývá program dokonale odladěn a jeho běh může být tudíž pomalejší. Prostor je poměrně jednoduché, neobsahuje našeptávač pro zrychlení práce. Prostor umí odhalit chyby v syntaxi, kód lze nechat zkontrolovat i bez nahrání do mikrokontroleru. Dále je možné komunikovat s mikrokontrolerem přes převodník mezi USB a sériovým portem. Tímto převodníkem, který většinou bývá součástí vývojové desky se také nahrává program do mikrokontroleru. Pro funkční komunikaci s PC je nutné nastavit správnou rychlost přenosu dat pro mikrokontrolér i pro počítač. Komunikaci jsem využíval hlavně v testovacích verzích programu, ke zjištění správné funkčnosti zařízení. Při nahrávání kódu do mikrokontroleru je nutné zvolit správný Port a správnou vývojovou platformu.



```
bistabilni_rele1.0 | Arduino 1.8.9
Soubor Úpravy Projekt Nástroje Nápověda

bistabilni_rele1.0

#define Rel0_1 6
#define Rel0_2 5 // definování pinů pro bistabilní relé
#define PulsePin 7 // definování pinu pro měření frekvence

bool Rel0,RelMem;
unsigned long ontime,offtime;
unsigned long prevtime = 0;
float freq,period;
int Delay = 2000; // definování potřebných globálních proměnných

void setup() {
  pinMode(Rel0_1,OUTPUT);
  pinMode(Rel0_2,OUTPUT); // nastavení pinů relé jako výstupních
  digitalWrite(Rel0_1, LOW);
  digitalWrite(Rel0_2, LOW); // nastavení pinů relé na 0 V

  pinMode(PulsePin,INPUT); //nastavení pinu pro měření frekvence jako vstup
}

void loop() {
  unsigned long actualtime = millis(); // definování lokální proměnné a čtení
  // aktuálního času od spoštění v milisekundách
  ontime = pulseIn(PulsePin,HIGH); // zapsání doby trvání klaného pulzu do
  // proměnné ontime
  offtime = pulseIn(PulsePin,LOW); // zapsání doby trvání záporného pulzu do
  // proměnné offtime

  Uložení dokončeno.

55 Arduino Nano na COM5
```

Obr. 6-4 Vývojové prostředí Arduino IDE

6.6.2 Okomentovaný kód

```
#define Relé0_1 6
#define Relé0_2 5 // definování pinů pro bistabilní relé
#define PulsePin 7 // definování pinu pro měření frekvence

bool Relé0, ReléMem;
unsigned long ontime, offtime;
unsigned long prevtime = 0;
float freq, period;
int Delay = 2000; // definování potřebných globálních proměnných

void setup() {
    pinMode(Relé0_1, OUTPUT);
    pinMode(Relé0_2, OUTPUT); // nastavení pinů relé jako výstupních
    digitalWrite(Relé0_1, LOW);
    digitalWrite(Relé0_2, LOW); // nastavení pinů relé na 0 V

    pinMode(PulsePin, INPUT); // nastavení pinu pro měření frekvence jako vstup
}
```

Obr. 6-5 Okomentovaný program pro mikropočítač

```
void loop() {
    unsigned long actualtime = millis(); // definování lokální proměnné a čtení
    // aktuálního času od spoštění v milisekundách
    ontime = pulseIn(PulsePin, HIGH); // zapsání doby trvání kladného pulzu do
    // proměnné ontime
    offtime = pulseIn(PulsePin, LOW); // zapsání doby trvání záporného pulzu do
    // proměnné offtime
    period = ontime + offtime; // sečtením dob pulzů se určí perioda
    freq = 1000000/period; // výpočet frekvence z periody

    if(freq > 47 && period != 0){
        Relé0 = 0; // Pokud se frekvence zvýší nad 47 Hz a perioda
    } // je různá od nuly rozepne se relé.
    if(freq < 47 && period != 0){
        Relé0 = 1; // Pokud se frekvence sníží pod 47 Hz a perioda
    } // je různá od nuly sepne se relé.
    if(period == 0){ // Pokud je nulová perioda (kolo se neotáčí) sepne
        Relé0 = 1; // se relé (jako nulová perioda se vyhodnocuje i
    } // pokud jeden z pulzů trvá delší dobu než 3 minuty).
    if(Relé0 != ReléMem){ // Pokud se změní stav relé tak se spustí časovač
        ReléMem = Relé0; // na dobu Delay.
        prevtime = actualtime + Delay;
    }
    if(Relé0 == 1 && prevtime > actualtime){ // Pokud je stav relé je roven 1,
        digitalWrite(Relé0_1, HIGH); // tak je na dobu delay přiveden
        digitalWrite(Relé0_2, LOW); // signál pro sepnutí relé.
    }
    if(Relé0 == 0 && prevtime > actualtime){ // Pokud je stav relé je roven 0,
        digitalWrite(Relé0_1, LOW); // tak je na dobu delay přiveden
        digitalWrite(Relé0_2, HIGH); // signál pro rozepnutí relé.
    }
    if(prevtime < actualtime){ // Po uplynutí doby delay se oba
        digitalWrite(Relé0_1, LOW); // výstupy pro relé přivedou na zem
        digitalWrite(Relé0_2, LOW);
    }
}
```

Obr. 6-6 Okomentovaný program pro mikropočítač

Blok Simulink-PS Converter převádí signál, kterému rozumí knihovna Simulink do signálu, kterému rozumí knihovna Simscape.



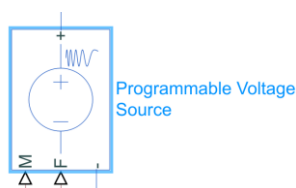
Obr. 7-4 Blok Simulink-PS Converter

Blok PS-Simulink Converter převádí signál, kterému rozumí knihovna Simscape do signálu, kterému rozumí knihovna Simulink.



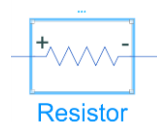
Obr. 7-5 Blok PS-Simulink Converter

Blok Programmable voltage source je zdroj nastavitelného napětí z knihovny Simscape. Zdroj mám nastaven tak, aby se hodnota napětí a frekvence měnila podle vstupů. Hodnota na vstupu M určuje velikost napětí a hodnota na vstupu F určuje frekvenci napětí. V modelu má význam jako indukované napětí cyklistického dynama.



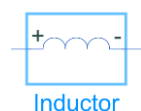
Obr. 7-6 Programmable voltage source

Blok Resistor v modelu nahrazuje vnitřní odpor vinutí cyklistického dynama. Tento odpor má velikost 3 Ω .



Obr. 7-7 Blok Resistor

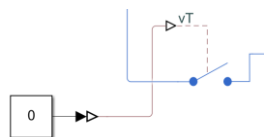
Blok Inductor v modelu nahrazuje indukčnost vinutí cyklistického dynama. Tato indukčnost má velikost 50 mH



Obr. 7-8 Blok Inductor

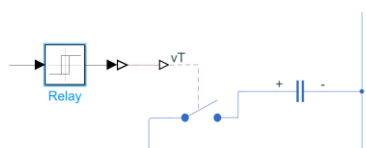
Na obrázku obr.7-9 je část modelu, na které pomocí zdroje konstantního signálu jsou ovládány kontakty. Tyto kontakty jsou využity ke zkratování kompenzačních kondenzátorů. Kontakt je sepnut při generování charakteristik nevykompenzovaného cyklistického dynama. Při

rozeptnutí kontaktu a spuštění simulace budou vygenerovány charakteristiky pro vykompenzované cyklistické dynamo.

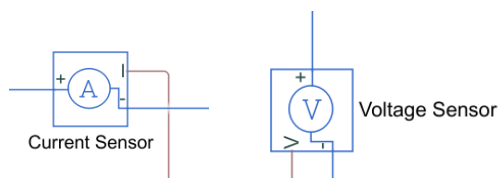


Obr. 7-9 Zkratování kondenzátorů

Na Obr. 7-10 je část modelu, která spíná nebo odpíná kompenzační kapacitu v závislosti na frekvenci. Pokud je frekvence nižší než 59 Hz je kontakt sepnut. Pokud je frekvence vyšší než 59 Hz je kontakt rozeptnut. O porovnávání frekvence se stará blok Relay. Taktéž je zde vidět značka kondenzátoru. Ve schématu jsou celkem dva kondenzátory. Oba dva kondenzátory mají hodnotu 110 μF .



Obr. 7-10 Připínání a odpínání kompenzační kapacity



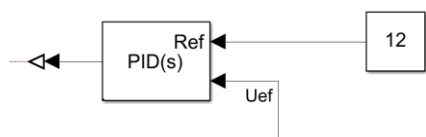
Obr. 7-11 Bloky pro měření napětí a proudu z knihovny Simscape

Blok nastavitelného odporu v modelu nahrazuje DC/DC měnič, a to z důvodu, že model by s DC/DC měničem byl příliš náročný na výpočetní výkon. Ze stejného důvodu není v modelu použit usměrňovací můstek.



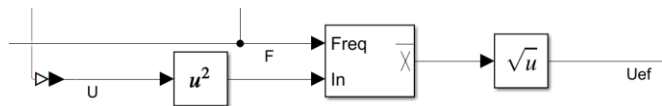
Obr. 7-12 Blok nastavitelného odporu z knihovny Simscape

Pro regulaci na konstantní napětí 12 V byl využit PID regulátor. Hodnota P byla nastavena na 2. Tato hodnota byla zjištěna metodou pokus omyl, pro příliš velké hodnoty P členu docházelo k překmitům a příliš malé hodnoty P členu nestihly reagovat. Po nastavení P členu byl nastaven I člen stejnou metodou, a to na hodnotu 0,006. Regulační člen D jsem nechal rovný nule, tudíž je tento regulátor pouze PI.



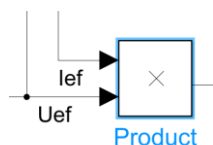
Obr. 7-13 PID regulátor

Část modelu na obrázku Obr. 7-14 počítá efektivní hodnotu ze vzorkovaného napětí pomocí třech bloků. První blok umocní hodnotu na druhou, druhý blok počítá průměrnou hodnotu a třetí blok odmocní výsledek. Je to pouze přepsaný vzorec pro efektivní hodnotu do bloků v Simulinku. Tímto způsobem je počítána okamžitá efektivní hodnota jak proudu, tak napětí.



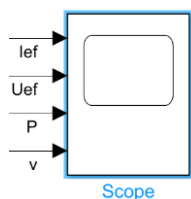
Obr. 7-14 Část modelu počítající efektivní hodnotu

Blok Product zde mezi sebou násobí dva signály, a to signál nesoucí hodnotu efektivního napětí a signál nesoucí hodnotu efektivního proudu.



Obr. 7-15 Blok Product

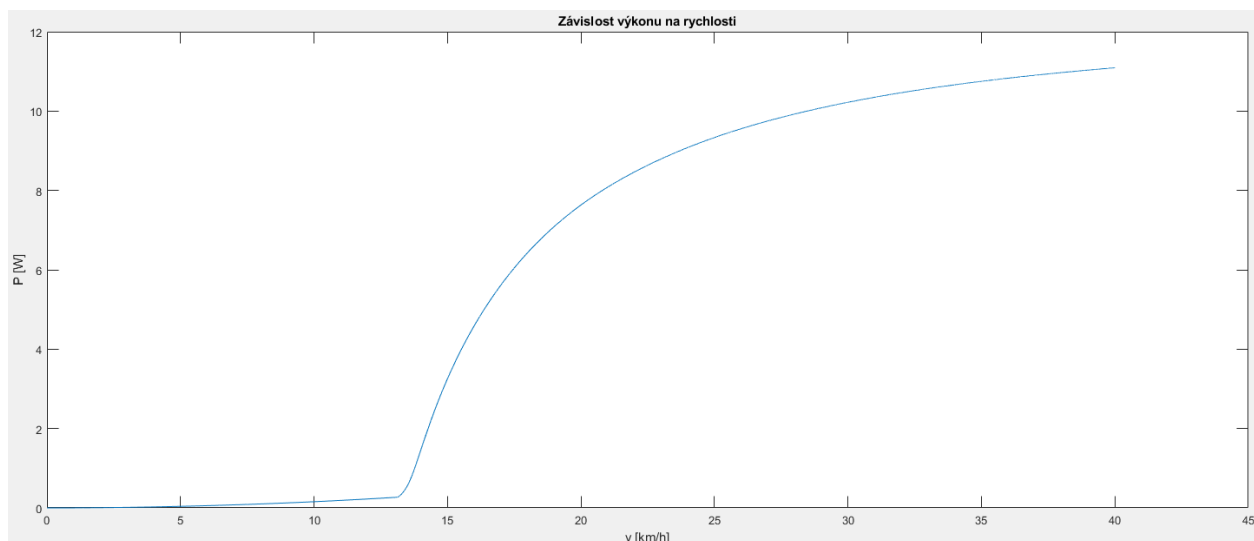
Blok Scope se stará o zobrazení generovaných průběhů efektivního proudu, efektivního napětí, výkonu a rychlosti. Pro výpočet rychlosti je využit blok Gain s konstantou 1/1,75. Tato konstanta vychází ze vztahu 5.1.



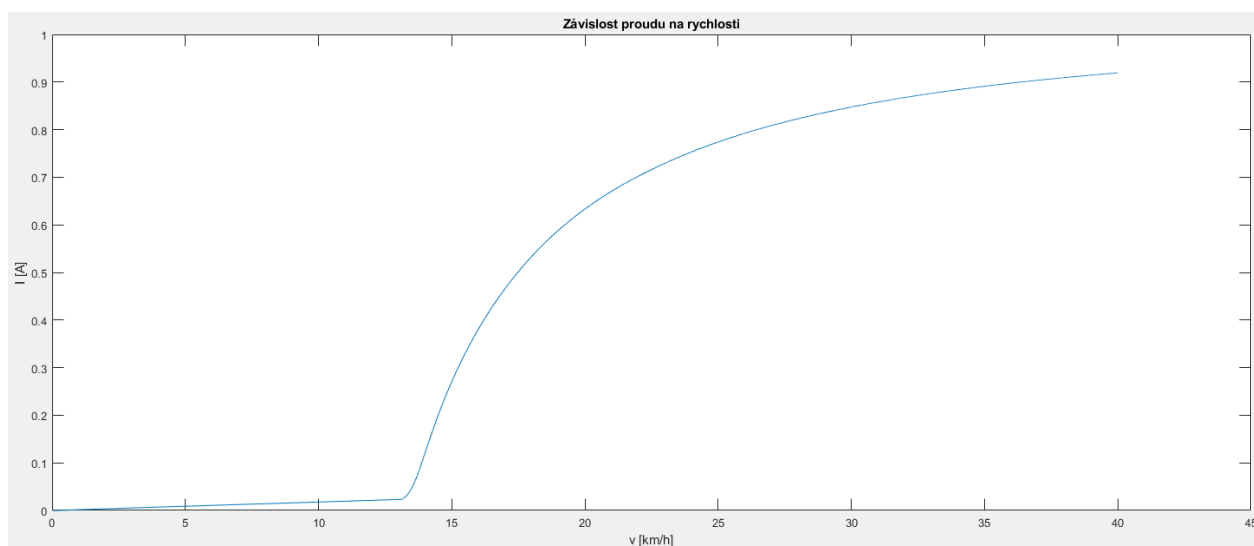
Obr. 7-16 Blok Scope

7.2 Simulace

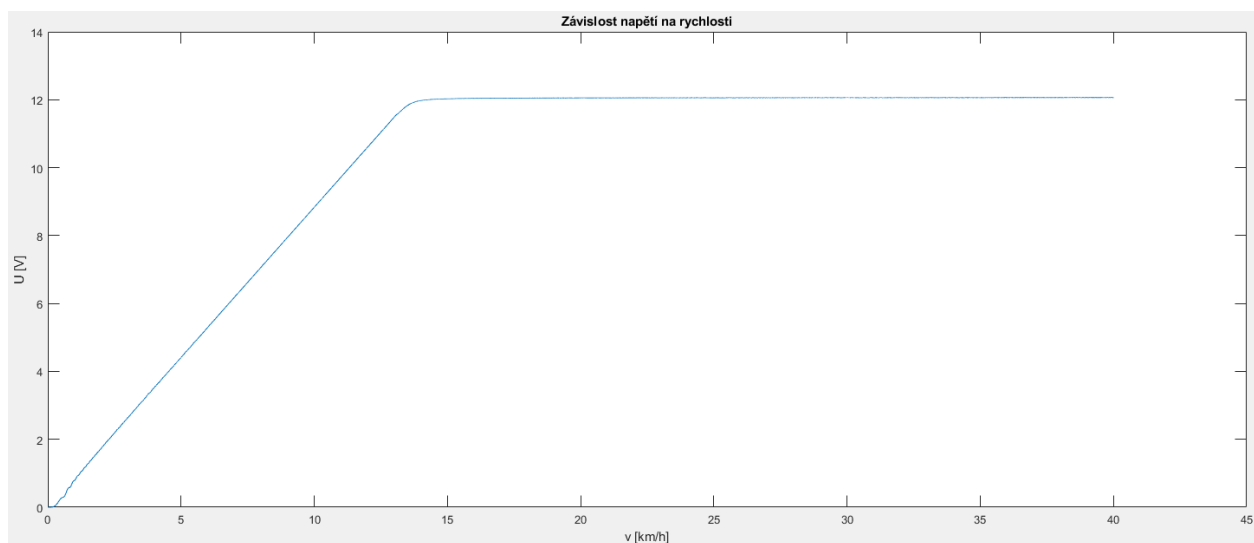
Na obrázku Obr. 7-17 můžeme vidět, jak napětí lineárně roste s frekvencí, až do hodnoty 24 Hz. Při této hodnotě frekvence již indukované napětí překročí 12 V a začíná fungovat MPPT regulátor, který reguluje hodnotu napětí na konstantních 12 V. Jinými slovy, pokud je indukované napětí menší než 12 V, tak není odebírán žádný proud a tím pádem ani výkon. Tvary jednotlivých průběhů vychází dle očekávání z reálného měření cyklistického dynama. Odebíraný proud je omezen indukčností a tato vlastnost se projevuje zpomalováním růstu proudu se zvyšující se frekvencí. Průběh odebíraného výkonu je totožný s průběhem efektivního proudu, to je způsobeno regulací na konstantní napětí 12 V. Naopak data z modelu se vůči změřeným liší ve velikosti odebíraného proudu, což je způsobeno konstrukcí cyklistického dynama. Nejspíše ten proud v reálném měření omezuje kombinace těchto faktorů: nelinearita magnetického obvodu, použití slabých magnetů, malá délka vodičů v drážce, nízký počet závitů.



Obr. 7-17 Průběh výkonu v závislosti na rychlosti pro model bez kompenzace indukčnosti

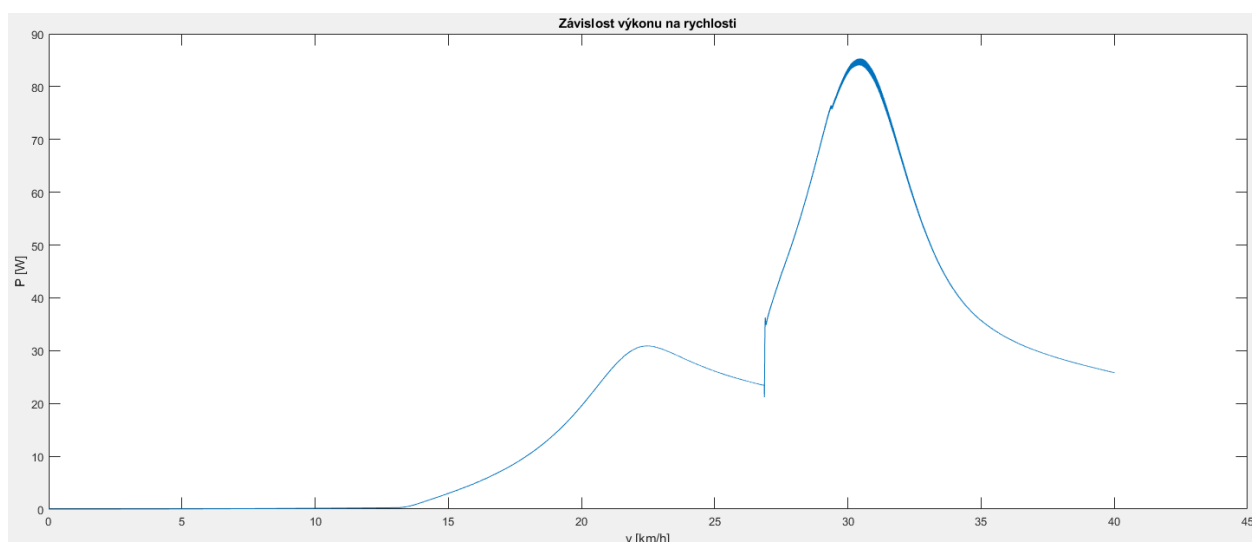


Obr. 7-18 Průběh proudu v závislosti na rychlosti pro model bez kompenzace indukčnosti

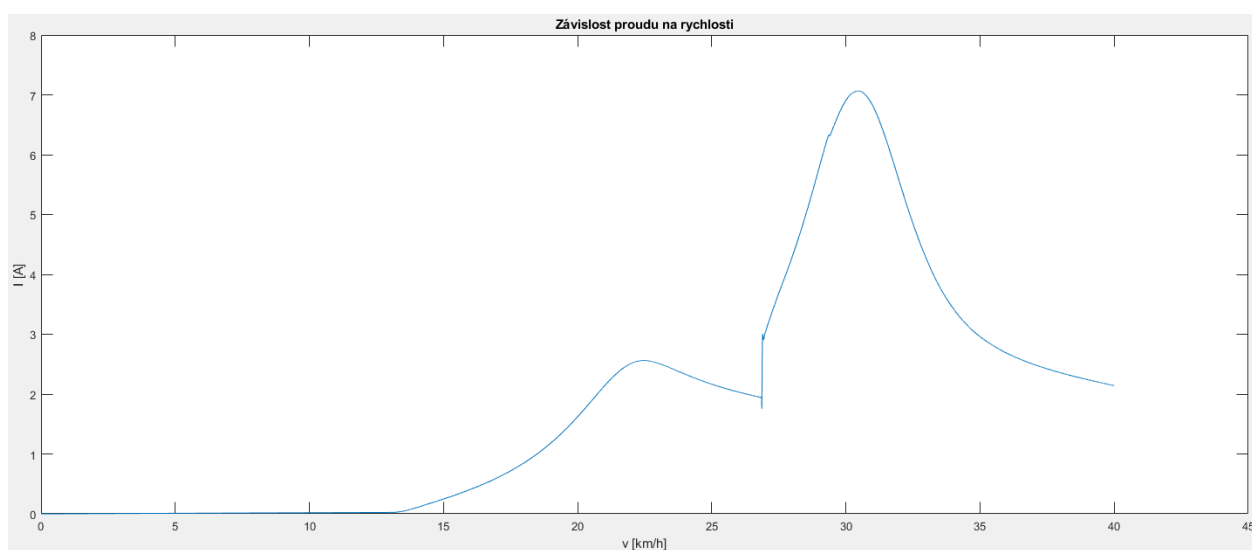


Obr. 7-19 Průběh napětí v závislosti na rychlosti pro model bez kompenzace indukčnosti

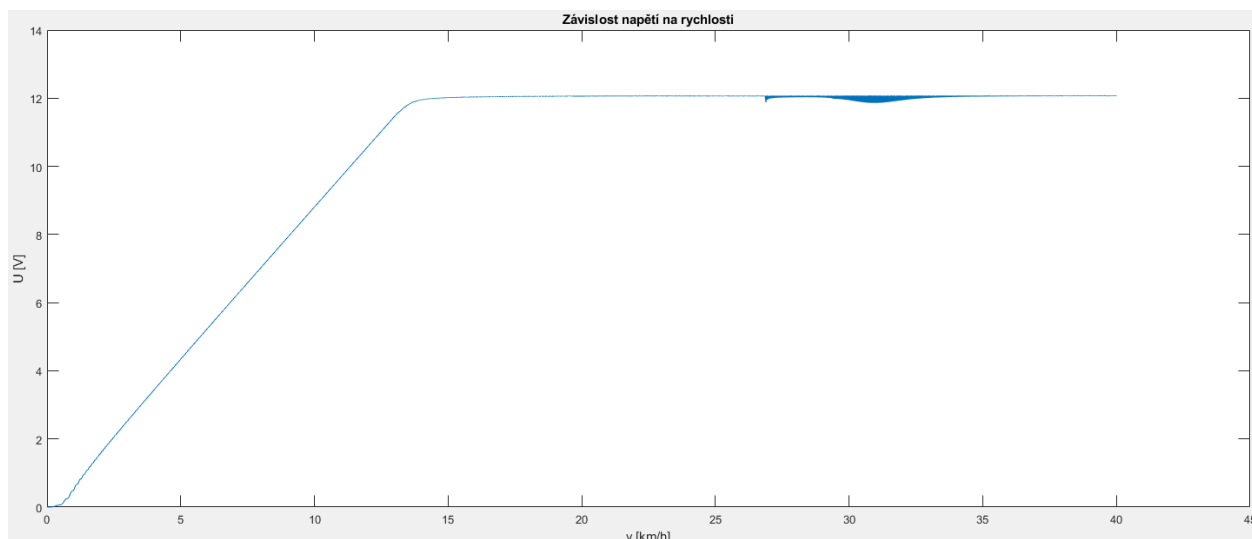
Na obrázku Obr. 7-18 jsou do frekvence 24 Hz průběhy totožné s obrázkem Obr. 7-17. Po překročení této frekvence je taktéž jako na Obr. 7-17 napětí regulováno na 12 V, avšak průběh proudu má dva vrcholy. První vrchol proudu při rychlosti 22 km/h je způsoben rezonancí kondenzátoru o kapacitě 220 μF a cívky o indukčnosti 80 mH. Při rychlosti 27 km/h nastane odepnutí jednoho ze dvou kondenzátorů o kapacitě 110 μF . Přechod při této frekvenci by měl být hladký bez většího skoku výkonu, a to z důvodu, že absolutní hodnoty obou reaktancí jsou si rovny. Výkonový je nejspíše způsoben regulací na konstantní napětí, protože s konstantní hodnotou odporu v zátěži je přechod hladký. Druhý vrchol proudu při rychlosti 31 km/h je způsoben rezonancí kondenzátoru o kapacitě 110 μF a cívky o indukčnosti 80 mH. Maximální hodnoty výkonu podle modelu jsou při první výkonové špičce 30 W a při druhé výkonové špičce dokonce přes 80 W. Odebírat takto veliký výkon z tak malého zdroje by způsobilo jeho zničení.



Obr. 7-20 Průběh výkonu v závislosti na rychlosti pro model s kompenzací indukčnosti



Obr. 7-21 Průběh proudu v závislosti na rychlosti pro model s kompenzací indukčnosti



Obr. 7-22 Průběh napětí v závislosti na rychlosti pro model s kompenzací indukčnosti

v [km/h]	14,3	17,1	20,0	21,7	22,9	25,7	28,6	30,3	32,6	34,3
f [Hz]	25	30	35	38	40	45	50	53	57	60
U [V]	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
I [A]	0,15	0,63	1,63	2,54	2,53	2,10	5,10	7,07	4,75	3,28
P [W]	1,8	7,56	19,56	30,48	30,36	25,2	61,2	84,84	57	39,36

Tabulka 7-1 Odečtené hodnoty z průběhů simulace s kompenzací indukčnosti

7.3 Měření vykompenzovaného cyklistického dynama

Měření s kompenzačními kondenzátory potvrdilo, že výkon lze kompenzačními kondenzátory zvýšit ovšem ne až tak moc, jak bylo předpokládáno. Může to být způsobeno těmito faktory: nelinearita magnetického obvodu – to je asi podstatné, indukčnost se v závislosti na pootočení rotoru mění asi 1 : 2, použití slabých magnetů, malá délka vodičů v drážce, nízký počet závitů. Samotné měření bylo dosti problémové, na přípravku se nedařilo dosáhnout nižších nebo vyšších frekvencí. Bylo to způsobeno nevhodným („měkkým“) hnacím motorkem, který při přejití rezonance nebyl schopen udržet konstantní otáčky. Proto bylo změřeno málo hodnot. Připínání a odpínání kondenzátoru v závislosti na frekvenci fungovalo. Měření proběhlo bez tohoto přepínání z důvodu velikého rozptylu měřené frekvence ± 10 Hz. U kondenzátoru s kapacitou 220 μF se nedařilo odměřit hodnoty při frekvenci vyšší než 40 Hz.

	v [km/h]	14,3	17,1	22,9	28,6
	f [Hz]	25	30	40	50
C = 110 μF	U [V]	12	12	12	12
	I [mA]	100	170	790	830
	P [W]	1,2	2,04	9,48	9,96
C = 220 μF	U [V]	12	12	12	12
	I [mA]	210	420	X	X
	P [W]	2,52	5,04	X	X

Tabulka 7-2 Naměřené hodnoty výkonu po vykompenzování indukčnosti

8 ZÁVĚR

V této bakalářské práci byla popsána funkce různých typů spínaných DC/DC měničů a hlavní rozdíly mezi jednotlivými zapojeními.

Je zde popsána teorie cyklistického nábojového dynama. Cyklistické dynamo má svým názvem, protože ve skutečnosti je to synchronní generátor (alternátor) s permanentními magnety. Díky tomu generuje střídavé napětí a proud. Ještě jsme si ověřili, že má poměrně velkou impedanci, která omezuje jeho výkon na vyšších frekvencích.

Byli odměřeny charakteristiky cyklistického dynama. Z charakteristik byly vypočteny parametry pro model v Simulinku. Z naměřených charakteristik nakrátko je patrné, že dynamo se od určité rychlosti chová jako zdroj s omezením proudu (550 mA).

V práci bylo navrženo zapojení, zajišťující získání vyššího výkonu pomocí kompenzačních kondenzátorů. Navržený obvod obsahuje i ochranné obvody proti přepětí, které se může při provozu vyskytnout a zničit připojený měnič. Schéma bylo zhotoveno na prototypovou destičku a zdárně otestováno.

MPPT algoritmus použitý pro získání co největšího výkonu spočívá v regulaci na konstantní napětí na vstupu měniče (v tomto případě 12 V). Ideálnější by byla regulace pomocí extrémálního regulátoru – hledání skutečného maxima výkonu, ale použitá regulace se jeví dostačující. Pro přepínání kompenzačních kondenzátorů byl zvolen mikropočítačový modul Arduino Nano a napsán program, který přepíná a odpíná kondenzátor podle frekvence výstupního napětí dynama.

Pro model navrhnutý v simulinku byly použity hodnoty změřené na reálném cyklistickém dynamu. Vygenerované charakteristiky z modelu vychází příliš optimisticky.

Při měření vykompenzovaného cyklistického dynama se ukázalo, že došlo k jistému zvýšení odebíraného výkonu, avšak toto zvýšení není tak velké, jak se očekávalo. Nejspíše je to způsobeno odbuzováním feritových magnetů vlivem proudu statoru.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] P. Vorel, P. Procházka: *Řídicí členy v elektrických pohonech* (skriptum VUT Brno)
- [2] M. Patočka: *Magnetické jevy a obvody ve výkonové elektronice*
- [3] A. Krejčířík, *DC/DC měniče*. Praha: BEN - technická literatura, 2001.
- [4] Č. Ondrůšek: *Elektrické stroje* (skriptum VUT Brno)
- [5] Katalogové listy firmy GME. [Online] [Citace: 3.1.2020]
Možno najít: <https://www.gme.cz/data/attachments/dsh.432-228.1.pdf>
- [6] Katalogový list CN3791. [Online] [Citace: 3.1.2020]
Možno najít: <http://www.consonance-elec.com/pdf/datasheet/DSE-CN3791.pdf>